

제 출 문

본 보고서를 「비정상적인 전파현상 분석 및 대응방안에 관한 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002. 12. 31.

연구책임자 : 이 대 용 (전파연구소)

연 구 원 : 곽 장 호 (전파연구소)

권 용 기 (전파연구소)

윤 세 정 (전파연구소)

요 약 문

1. 과제명

비정상적인 전파현상 분석 및 대응방안에 관한 연구

2. 연구 기간 : 2002. 4. 1. ~ 2002. 12. 31.

3. 연구책임자 : 이 대 용

4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정												비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
o 연구과제 계획수립 및 총괄	이대용													
o 외래전파 조사, 측정	윤세정													
o 외래전파 유입현황 분석	곽장호													
o 측정 자료 DB화	"													
o 국내 기상자료 분석	권용기													
o 라디오 덕트 시뮬레이션	"													
분기별 수행진도 (%)						30		30		40				

나. 세부 과제별 추진사항

1) 외래전파 조사, 측정

- o 우리소 자체 측정 : 포항, 인천지역 등 4회
- o 공동측정(중관소) : 부산, 평택 등 2회

2) 외래전파 유입현황 분석 및 자료 DB화

- 국내 해안지역별 일본, 중국 전파 유입현황 정리
- 월별, 년도별 외래전파 유입현황
- 주파수별, 무선국별 외래전파 유입현황
- 측정자료 및 현황분석자료 DB화
- 3) 국내 기상자료 분석 및 라디오 덕트 시뮬레이션
 - 포항 지역 기상자료 수집 및 분석을 이용한 국내 대기 특성인자 추출
 - 라디오덕트에 의한 전파전파 특성 시뮬레이션 및 고도별 외래전파 영향 분석

5. 연구 결과

- 1) 국내 해안지역별 전파침투 현황 정리
 - 주요 혼신야기 주파수 및 주요 침투위치 등
- 2) 유입 외래전파 및 국내 기상자료 DB화
- 3) 라디오덕트 발생원인 분석 및 전파전파특성 분석 프로그램 작성
 - 주요 주파수별 외래전파 영향 분석

6. 기대효과

- 전파간섭신호 예측 기법 확보
- 무선통신 서비스 품질 향상
- 국내 주파수 자원의 보호

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유 현황	확보방안	비 고
o 이동측정 차량	젤로퍼	1	인력 및 장비 수송	미보유	'03예산 반영	
o 스펙트럼분석기	>3GHz	1	전계강도 측정	보유		
o LP 안테나	0.2~ 1.2GHz	1	외래전파 수신	미보유	'03예산 반영	
o 노트북 컴퓨터	처리속도: >1GHz	1	측정 프로그램 운용	미보유	'03예산 반영	
o 서버급 컴퓨터	>1GHz	1	자료 저장 및 분석	보유		

8. 기타사항

o 없음

SUMMARY

In this paper, we discuss the radio-wave interference problems caused by Japanese and Chinese radio waves in the coastal regions of Korea. Through the analysis of the radio-wave interference mechanisms described by the ITU-R P.452-10 recommendation, we conclude that the main reason of the radio-wave interference is radio duct. In this paper, we will explain the concept, origin and type of the radio duct, and derive and discuss the main duct parameters of Pohang region in Korea. In this region, finally, we will discuss the proper receiver height where the radio communication system of Korea may have the smallest radio-wave interference from the Japanese radio waves.

표 목 차	395
그림목차	396
제 1 장 서 론	399
제 2 장 국내 해안지역 외래전파 유입 현황	401
제 1 절 개요	401
제 2 절 2002년도 외래전파 유입현황 분석	403
제 3 절 외래전파 유입현황 년도별 비교분석	421
제 3 장 주요 전파간섭 메카니즘 검토	426
제 1 절 주요 전파간섭 메카니즘	426
제 2 절 국내 해안지역 외래전파 유입원인 검토	430
제 4 장 라디오 덕트(Radio Duct)	433
제 1 절 지상대기 구조	433
제 2 절 대기굴절을	435
제 3 절 라디오 덕트	439
제 5 장 포항지역 라디오덕트 특성 및 주요 주파수	
대역별 최적 수신 고도 분석	443
제 1 절 국내 기상자료 분석	443
제 2 절 라디오 덕트에 의한 전파전파 특성 시뮬레이션	452
제 3 절 실제 기상자료와 전파전파 시뮬레이션을 이용한	

고도별 외래전과 수신세기 예측	464
제 6 장 결 론	473
참고문헌	477

표 목 차

표 2-1	한일간 주파수 대역 비교	402
표 2-2	한중간 주파수 대역 비교	402
표 4-1	수정굴절을 M 기울기와 굴절도 N 기울기 관계	440
표 5-1	대기굴절을 특성 분석에 이용한 고층 기상 자료	444
표 5-2	ITU-R 제공자료와 최근 3년 기상 분석자료 비교	449

그 립 목 차

그림 1-1	국내 해안지역별 인접국 현황	400
그림 2-1	1분기 지역별 외래전과 유입현황	406
그림 2-2	1사분기 용도별 외래전과 유입 현황	407
그림 2-3	2사분기 조사 지역별 외래전과 유입 현황	410
그림 2-4	2사분기 용도별 외래전과 유입 현황	410
그림 2-5	1분기와 3분기 측정데이터의 주파수 대역별 비교 현황	414
그림 3-1	장기간 전파간섭 메카니즘	427
그림 3-2	단기간 전파간섭 메카니즘	427
그림 3-3	라디오 덕트 종류 (표면덕트, 상층덕트)	429
그림 3-4	기하학적 가시거리	431
그림 4-1	온도변화에 따른 대기권 구분	434
그림 4-2	유효지구반경(b) 및 수정굴절율(c)에서의 전파의 진행	438
그림 4-3	수정굴절율(M) 기울기 변화에 따른 전파 전파 특성	440
그림 4-4	표면덕트와 상층덕트	442
그림 4-5	덕트 내에서의 전파전파 특성 비교	442
그림 5-1	덕트관련 주요 파라메타 정의	444
그림 5-2	덕트 발생 확률 (월별)	445
그림 5-3	표면덕트 평균 강도 및 두께	446
그림 5-4	상층덕트 평균 강도 및 두께	447

그림 5-5 상층덕트 및 덕팅층 최초 위치	448
그림 5-6 고도별 덕트 발생 확률 (포항지역)	451
그림 5-7 표준대기에서의 전파전파특성 비교 (200, 800, 2000MHz)	454
그림 5-8 표면덕트에서의 전파전파특성 비교 (표면 덕트내 송신기가 위치한 경우)	456
그림 5-9 표면덕트에서의 전파전파 특성 비교 (표면덕트 위에 송신기가 위치한 경우)	458
그림 5-10 상층덕트에서의 전파전파특성 비교 (상층덕트 내에 송신기가 위치한 경우)	460
그림 5-11 상층덕트에서의 전파전파특성 비교 (상층덕트 위에 송신기가 위치한 경우)	462
그림 5-12 상층덕트에서의 전파전파특성 비교 (상층덕트 아래 송신기가 위치한 경우)	463
그림 5-13 고도별 평균 전계강도 및 표준대기 에서의 전계강도 비교	466
그림 5-14 200MHz 전파의 고도별 시간율 특성	470
그림 5-15 800MHz 전파의 고도별 시간율 특성	471
그림 5-16 2GHz 전파의 고도별 시간율 특성	472

제 1 장 서 론

전파(electromagnetic wave)는 열려진 공간을 통하여 자유로이 전파(propagation)한다. 따라서 동일한 주파수 대역에서 유사한 서비스를 제공하거나 서로 다른 종류의 서비스를 제공하는 경우 양 무선국 사이에는 전파혼신이나 전파간섭 가능성이 항상 존재한다. 따라서 세계 각 국가에서는 이를 줄이기 위하여 무선국 허가제도를 운용하고 있으며 무선국 허가시 신규 무선국이 타 무선국에 미칠 수 있는 전파간섭 여부를 예측하여 무선국 허가여부를 결정하므로서 전파간섭을 사전에 방지하고 있다.

그러나 수 백 km 이상 떨어진 국가 간에 발생하는 전파간섭 현상은 이를 해결할 수 있는 별다른 방법이 없다. 부분적으로 ITU에서는 국가간 전파간섭 현상을 방지하고 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위하여 권고안을 마련하여 각국이 준수토록 하고 있으나 수 백 km 이상 떨어진 국가간 전파간섭 가능 주파수 대역은 전리층 통신을 이용하는 장파, 중파 또는 단파 대역만을 대상으로 하고 있어 이보다 높은 주파수 대역인 VHF나 UHF 대역 전파는 인접국간 협상을 통하여 조정할 수 밖에 없다.

1994년 일본 무선호출신호가 최초 수신된 이래 국내 해안지역에서는 250km이상 떨어진 중국이나 일본 지역의 VHF/UHF 대역 전파의 신호세기나 유입 주파수 대역 등은 점차 증가하는 추세이다. 일반적으로 100MHz이상의 VHF/UHF 대역 전파는 전리층 통신이 불가능하며 오직 가시경로에 의한 직진이나 반사에 의한 통신만이 가능한 것으로 알려져 있어 VHF/UHF 대역의 일본이나 중국 전파가 250km 이상 떨어진 국내 해안지역에 높은 세기로 수신되며 때로는 국내 통신망에 간섭현상을 야기한다는 것은 특이한 현상이다. 따라서 우리는 인접국 전파에 의해 국내 해안지역에서 전파간섭 현상이 발생하는 원인을 분석하고 이를 해결할 수 있는 방안을 마련하기 위하여 2002년 4월부터 3년 연구과제로서 본 연구를 수행하고 있다.

본 연구보고서의 2장에서는 100MHz 이상의 전파를 대상으로 국내 해안지역으로 유입되는 일본이나 중국 전파 유입 현황을 정리하며 제3장에서는 일본이나 중국의 VHF/UHF 대역전파가 250km 이상 떨어진 남/동해안이나 서해안 지역에 영향을 미칠 수 있는지를 ITU에서 기술한 전파간섭 메카니즘을 중심으로 검토한다. 제4장에서는 인접국간 전파월경 원인으로 예상되는 라디

오덕트의 정의 및 원인, 종류 등을 알아보며 라디오 덕트에서의 전파전파 특성에 대하여 기술한다. 제5장에서는 국내 포항지역의 기상자료를 이용하여 이 지역에서의 덕트 발생확률, 덕트 강도 및 덕트 두께 등 국내 기상 특성을 구하여 이를 ITU에서 제공하는 자료와 비교, 검토한다. 한편 포항지역의 기상자료와 대기권에서의 전파전파 특성 프로그램을 이용하여 국내 해안지역의 높이별 일본전파 수신세기를 구하고 이를 기준으로 1%, 5%, 10% 시간율 특성 전계강도 세기를 분석하여 일본전파에 의해 가장 영향을 작게 받을 수신고도에 대하여 논의한다.

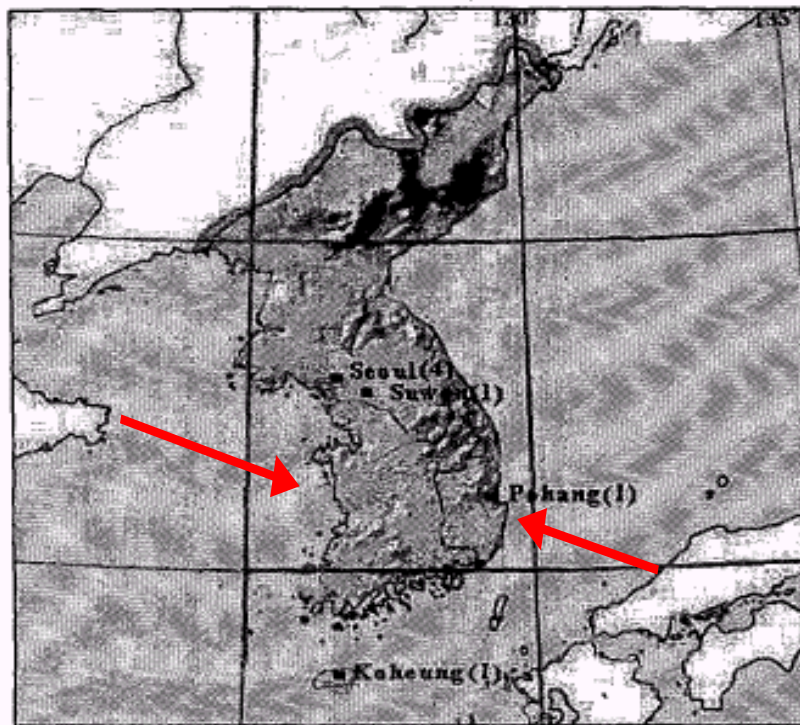


그림1-1 국내 해안지역별 인접국 현황

제 2 장 국내 해안지역 외래전파 유입 현황

제 1 절 개 요

최근 들어 남/동해안 지역에서는 832~834MHz 대역의 일본 Cellular 이동통신 신호가 국내의 SK 텔레콤에 간섭을 일으키는 것이 확인되었으며, 2000년도에 중앙전파관리소 이동측정에서 93파가 유입되는 것으로 조사되었으나, 2001년도에는 236파가 측정되는 등 일본전파의 국내 해안지역 침투현상은 점진적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한 중국 이동통신 시장의 활성화와 함께 국내 서해안 일대에 중국 무선호출 신호등에 의한 간섭현상이 보고되고 있으며, 2001년도에 204파의 무선호출 신호가 유입되었을 정도로 중국 무선호출 신호에 의한 국내경찰 및 항무 통신에서 혼신 발생 빈도가 점차적으로 증가하고 있다.

이와같이 인접국가로부터 유입되는 유해한 전파간섭 현상을 분석하고 효과적으로 대응하기 위해서는 먼저 외래전파 유입현황에 대한 정확한 측정자료와 그 분석이 선행되어야 한다. 따라서 여기서는 2002년도 측정자료를 중심으로 2001, 2000년도 측정자료와 비교, 분석하였다.

1. 인접국 주파수 할당 비교

국내에 비정상적으로 유입되어 영향을 줄 수 있는 일본, 중국 등 인접국의 주파수 할당 내역을 비교해보면, 일본 무선호출은 275-317MHz에서 178개의 채널이 분배되어 있으며, 국내에서는 자동차 시동용 특정 소 출력 무선으로 분배되어 있다. 일본 유입 파가 가장 많은 350MHz 대역은 시각장애인 유도 신호용 휴대장치가 국내에 할당되어 있으나 혼신 민원은 발생하지 않고 있다. 그러나 810MHz 대역에서는 일본 CRP (car radio phone)에 의해 국내 경주 한국전력 TRS에 혼신이 발생하여 현재 해당 채널을 운용하지 않고 있다.

중국의 무선호출은 137-140MHz, 146-167MHz, 279-281MHz에 분배되어 있으며, 국내 동 대역에서는 경찰청 30파, 내무행정용 10파, 해양경찰청 100

표 2-1 한일간 주파수 대역 비교

	273	311.01	311.12	317	320	335.4	358.50	358.53	371.5	381.5	475	810	828	900
한국	고정 및 이동				고정 및 이동				고정/이동	TRS, TV, 이동				
	원격시동		무선호출		시각장애		TRS		TRS		TRS			
일본	무선호출,항공		항공,육이국		항공, 해상, 경찰,고속열차				고정/이동	다중	CRP	통신		

표 2-2 한중간 주파수 대역 비교

	137	140	146	167	273	279	281	322
RR	고정,이동,우주연구,이동위성,해상이동					고정, 이동		
중국	pager		pager			pager		
한국	치안통신,콜택시,해상통신,국가산업통신					항무통신		

파, SK 텔레콤 53파, 해상통신용 선박국 53파, 해안국 55파 등으로 분배되어 있다. 또한 중국 유입 파가 가장 많은 150MHz 대역은 국내 서해안의 경찰망 및 항무 통신망 등이 항상 전파간섭 환경에 노출되어 혼신 민원 발생 가능성이 내포하고 있다.

2. 2002년도 인접국 외래전파 유입현황 조사

2002년도 인접국 외래전파 유입현황 조사는 전파연구소와 중앙전파관리소가 정기적으로 국내 해안지역에 대한 측정 조사를 수행하였으나, 본 논문에서는 년도별 변화량을 분석하기 위해 3개년 동안 측정을 수행한 중앙전파관리소 이동 측정 데이터만 분석에 사용하였다.

□ 분석에 사용된 중앙전파관리소 측정데이터 조사 내역

분 기	기 간	서해안 지역	동·남해안 지역
1 / 4	3. 25 - 3. 29	보령, 군산	동해, 삼척, 거제
2 / 4	5. 6 - 5. 10	평택, 부안, 영광	울진, 영덕
3 / 4	7. 8 - 7. 12	목포, 진도	강릉, 포항, 경주
4 / 4	10. 7 - 10. 11	강화, 영종도, 여수	울산, 진해

□ 측정시스템 및 분석 사항

- 측정장비
 - 이동 방탐기, LP-Antenna, 전계강도 측정기, Pager decoder 사용
- 측정대역
 - VHF/UHF 대역의 모든 무선국
- 측정방법
 - 전파환경을 고려하여 주로 해안지역 측정
 - 수신전파의 방향별 최대 수신세기, 안테나 지향각 변경 및 방향탐지 장비를 이용하여 전파의 도래방향 측정
 - 외래전파에 대한 전계강도 및 스펙트럼 측정
- 통계적 분석 사항
 - 년도별 유입전파 비교
 - 지역별 외래전파 유입현황
 - 주파수 대역별 유입현황
 - 국종별 유입현황 및 수신세기 현황
 - 수신세기별 유입현황

제 2 절 2002년도 외래전파 유입현황 분석

1. 1사분기

□ 동해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 강원도 강릉, 동해, 삼척
- 주파수 대역별 출현 현황

구 분	240MHz	250MHz	260MHz	280MHz	소 계
출 현 파 수 (파)	1	2	3	2	8
출 현 건 수 (건)	1	12	14	2	29
평균세기(dB μ V/m)	2.3	1.7	-0.3	10.4	1.3

○ 용도별 출현 현황

구 분	방송(러시아)	무선호출(일본)	항공(일본)	소 계
출현파수(파)	3	3	2	8
출현건수(건)	14	8	7	29
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	-0.3	3.4	2.3	1.3

○ 지역별 출현 현황

구 분	강릉	동해	삼척	소 계
출현파수(파)	6	7	5	8
출현건수(건)	6	14	9	29
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	-1.2	2.6	1.0	1.3

□ 서해안 지역 측정결과

○ 측정 조사 지역 : 충남 보령, 전북 군산

○ 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	130MHz	140MHz	150MHz	250MHz	260MHz	270MHz	280MHz	소 계
출현파 수 (파)	5	1	6	1	2	6	1	22
출현건 수 (건)	8	2	8	1	2	6	1	28
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	13.0	15.8	11.4	16.6	17.3	20.8	20.2	16.4

○ 지역별 출현 현황

구 분	보령(옥마산)	보령(대천)	군산(오성산)	소 계
출현파수(파)	7	5	12	24
출현건수(건)	8	6	14	28
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	15.7	16.5	14.2	15.5

□ 남해안 지역 측정결과

- 측정 조사 지역 : 경남 거제, 통영
- 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	240MHz	250MHz	260MHz	280MHz	310MHz	350MHz	360MHz
출현파 수 (파)	1	6	1	12	2	26	1
출현건 수 (건)	1	24	1	67	2	57	1
평균세기(dB μ V/m)	20.5	15.16	20	28.23	37.5	26.23	19
구 분	380MHz	390MHz	450MHz	460MHz	810MHz		소 계
출현파 수 (파)	2	1	3	1	10		66
출현건 수 (건)	3	1	8	2	22		190
평균세기(dB μ V/m)	31	19	21.5	27	30.68		24.66

- 지역별 출현 현황

구 분	거 제	통 영	소 계
출현파수(파)	49	37	86
출현건수(건)	109	81	190
평균세기(dB μ V/m)	28.49	22.46	15.5

- 용도별 출현 현황

구 분	미상	항공 보안청	무선 호출	해상이동	JR고속 철도	경찰청
출현파수(파)	12	2	11	3	1	17
출현건수(건)	14	9	74	8	1	27
평균세기(dB μ V/m)	23.57	19.7	26.98	15.75	17	18.81
구 분	해상 보안청	건설성	고정, 이동	CRP		소 계
출현파수(파)	7	1	1	11		66
출현건수(건)	28	1	6	22		190
평균세기(dB μ V/m)	34.11	19	22.66	30.68		22.82

□ 1사분기 외래전파 유입현황 요소별 종합 분석 결과

강릉, 동해, 삼척 등 동해안지역에서 8과 29건의 외래전파가 유입된 것으로 조사되었으며, 주파수 대역별로는 260MHz대역이 3과 14건으로 가장 많은 출현 현상을 보이고 있다. 또한 250MHz대역이 2과 12건으로 나타나 250~260MHz 대역에서 집중적으로 유입되는 것을 볼 수 있다. 혼신 발생 가능성은 280MHz 대역을 제외하고는 거의 없는 것으로 판단할 수 있으나, 하절기에는 기온 상승에 따라 수신세기가 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 보령, 군산 등 서해안 지역에서는 총 22과가 수신되었으며, 모두 300MHz이하인 VHF대역에서 출현하였다. 또한 전년도에 출현되지 않았던 200MHz대역에서 10과가 수신되어 전년도 (13과) 대비 169%의 증가율을 보이고 있다. 거제, 통영 등 남해안 지역에서는 200MHz ~ 800MHz 까지 다양한 주파수 대역에서 외래 전파가 출현하였으며, 특히 280MHz, 350MHz, 810MHz에서 집중적으로 유입되고 있다.

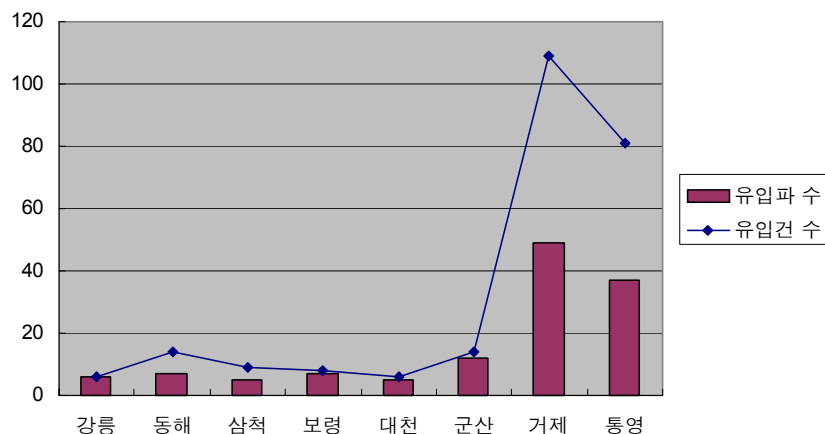


그림 2-1 1분기 지역별 외래전파 유입현황

그림 2-1은 1사분기 측정지역의 유입현황 분포를 나타낸 것으로 동일한 기간 동안에 거제 49과, 통영 37과 등 남해안 지역에서 일본 전파의 유입이 점점 증가하는 추세를 볼 수 있다. 서해안과 동해안 지역은 비슷한 분포를 보이며, 지속적으로 중국 무선호출 신호, 러시아 방송 등 인접국 외래전파가 유입되고 있다. 특히 보령(대천 포함)과 군산지역에 유입된 외래전파는 각각 12과로 동일하였으나, 중복 유입 파는 1과(158.925MHz)로 조사되었다. 또한

270MHz대역에서는 군산지역은 6파가 수신된 반면, 보령지역에서는 유입되지 않고 있어, 두 지역 간의 전파수신환경 차이에 의한 것으로 판단되어진다.

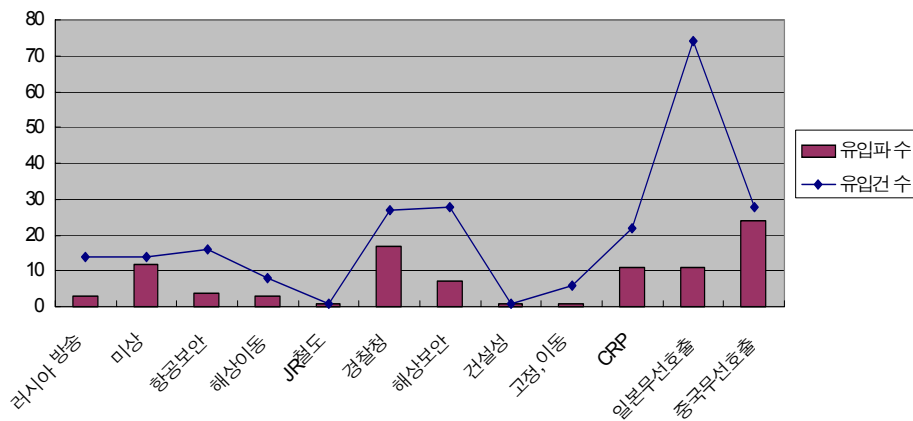


그림 2-2 1사분기 용도별 외래전파 유입 현황

그림 2-2는 용도별 출현 현황을 분석한 것으로 중국 무선호출 신호가 가장 많이 유입된 것을 볼 수 있다. 즉 서해안 지역에 유입되는 외래전파는 대부분 중국에서 발사되는 F2D 형식의 무선호출 신호로서, 방위각은 지역별로 조금의 차이는 있으나 280도를 중심으로 240 ~ 320도 사이에서 조사되었으며, 신호세기는 20dB μ V/m이하로 국내 주파수에 미치는 영향은 적다고 판단된다. 동해안 지역에서는 러시아 방송이 3파 14건으로 가장 많은 유입현상을 보이고 있는데 평균 수신세기는 -0.3dB μ V/m으로 상당히 미약한 것으로 나타났다. 러시아 V/UHF 무선국의 국내유입은 이번에 최초로 조사되었으며 TV방송의 음성신호로 추정되고 있다. 일본 무선국은 경찰청 17파, 해상 보안청 7파, 무선호출 11파 등이 지속적으로 유입되고 있으며, 그동안 국내 통신망과 혼신야기 등의 문제가 되었던 810MHz 대역의 CRP 신호도 지속적으로 유입되고 있는 것으로 조사되었다.

따라서 1사분기 외래전파 측정결과 국내 해안지역에서 일본, 중국 등 인접국의 외래전파가 지속적으로 유입되고 있는 것이 조사되었으며, 주파수 대역도 전 방위에 걸쳐 다양한 용도의 무선신호가 유입되어 국내 전파환경에 유해한 간섭을 줄 수 있는 가능성을 내포하고 있었다.

2. 2사분기

□ 동해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 울진, 영덕
- 주파수 대역별 출현 현황

구 분	250MHz	260MHz	270MHz	280MHz	소 계
출 현 파 수 (파)	14	1	2	11	28
출 현 건 수 (건)	27	3	2	36	68
평균세기(dB μ V/m)	19	23	14	15	17.75

- 지역별 출현 현황

구 분	울 진	영 덕	소 계
출현파수(파)	14	17	31
출현건수(건)	26	42	68
평균세기(dB μ V/m)	20	15	17.5

- 용도별 출현 현황

구 분	항공 보안청	항공 보안 대역	무선호출	해상이동	소 계
출현파수(파)	3	6	13	5	27
출현건수(건)	7	11	44	6	68
평균세기(dB μ V/m)	21	18	16	19.3	18.575

□ 서해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 경기도 평택, 안산, 전북 부안, 영광
- 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	130MHz	150MHz	160MHz	250MHz	270MHz	280MHz	소 계
출현과 수 (과)	9	7	1	1	5	2	25
출현건 수 (건)	15	15	1	1	8	2	42
평균세기(dB μ V/m)	11.2	-3.9	14.4	18.8	-4.9	-8.0	4.6

- 지역별 출현 현황

구 분	평 택	안 산	영 광	부 안
출현과수(과)	14	12	6	4
출현건수(건)	18	12	8	4
평균세기(dB μ V/m)	-4.2	-5.6	18.4	21.1

□ 2사분기 외래전파 유입현황 요소별 종합 분석 결과

평택, 안산, 부안, 영광 등 서해안에서 25과 42건의 외래전파가 유입된 것으로 조사되었으며, 주파대역별로는 130MHz, 150MHz 대역이 가장 많은 출현 현상을 보이고 있다. 울진, 영덕 등 동해안 지역에서는 동일 기간에 서해안 지역보다 많은 28과 68건의 외래전파가 유입되어 중국보다는 일본에서 비정상적으로 유입되는 외래전파 영향이 많은 것으로 판단된다. 그림2-3, 2-4는 2사분기 동안 동·서해안 유입된 외래전파의 지역별, 용도별로 분류한 자료로서 지역별로 약간의 차이를 두고 있다. 서해안 지역에서는 평택, 안산이 부안, 영광보다 유입 전파는 많이 나타났으나, 전파세기 면에서는 오히려 부안, 영광보다는 미약한 것을 볼 수 있다. 따라서 전파간섭 영향의 관점에서 볼 때는 부안, 영광 지역이 외래전파에 대한 혼신 가능성은 평택, 안산

보다 더 높다고 판단된다.

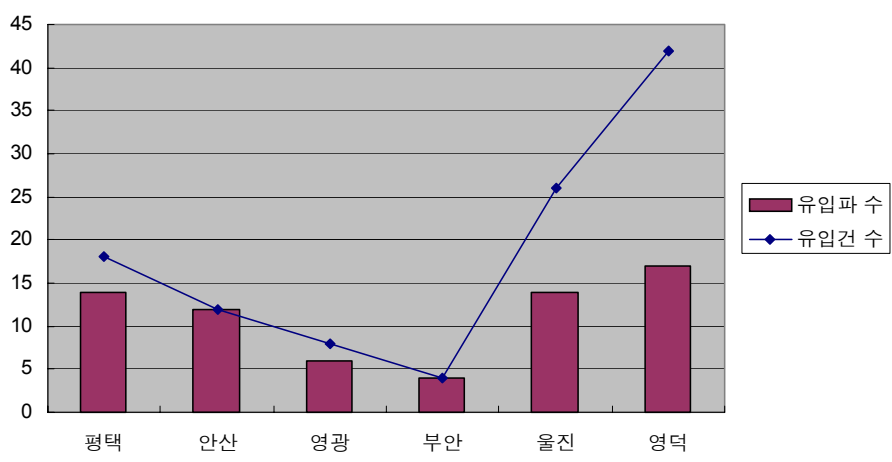


그림 2-3 2사분기 조사 지역별 외래전파 유입 현황

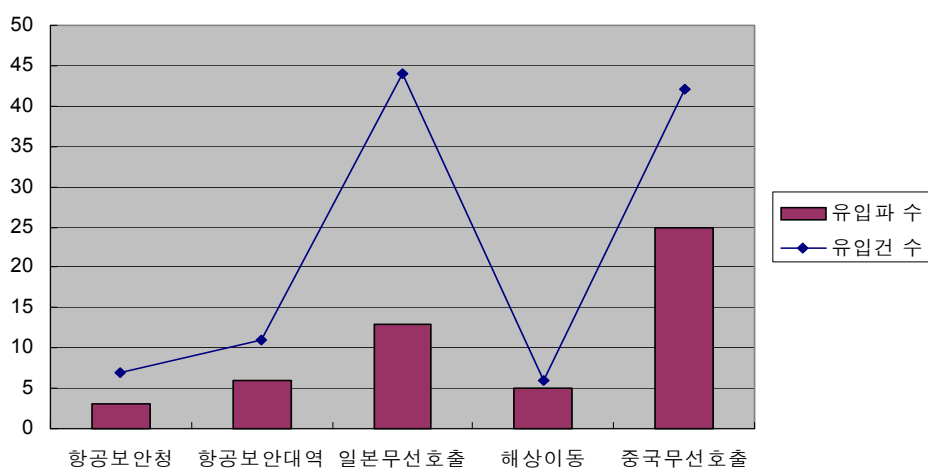


그림 2-4 2사분기 용도별 외래전파 유입 현황

중국에서 도래하는 외래전파의 대부분은 F2D형식인 무선호출 신호로 지속성이 없고 매우 불규칙적으로 나타났으며, 일본에서 유입되는 신호는 항공보안청, 항공보안 대역, 무선호출, 해상이동 등 다양한 대역에서 출현하였다. 일본 무선호출 신호의 경우 잡음레벨에서 신호를 식별할 수 있는 정도로 미약하게 나타났으며, 기상에 따라 변화요소를 내포하고 있었다.

3. 3사분기

□ 동해안 지역 측정 결과

○ 측정 조사 지역 : 강원도 강릉, 속초

○ 주파수 대역별 출현 현황

구 분	240MHz	250MHz	260MHz	280MHz	450MHz	소 계
출 현 파 수 (파)	2	3	2	1	1	9
출 현 건 수 (건)	9	18	9	5	3	44
평균세기(dB μ V/m)	12.9	10.2	4.1	10.9	2.4	8.1

○ 용도별 출현 현황

구 분	러시아 방송	일본 항공	일본 무선호출	일본 해상이동	소 계
출현파수(파)	2	3	3	1	9
출현건수(건)	9	16	15	4	44
평균세기(dB μ V/m)	4.1	11.3	7.9	15.5	9.7

○ 지역별 출현 현황

구 분	강 릉	속 초	소 계
출현파수(파)	8	9	17
출현건수(건)	17	27	44
평균세기(dB μ V/m)	9.1	9.0	9.05

□ 남해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 포항, 경주
- 주파수 대역별 출현 현황

구 분	130MHz	250MHz	280MHz	330MHz	350MHz	소 계
출 현 파 수 (파)	2	3	17	1	30	53
출 현 건 수 (건)	2	19	69	1	43	134
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	16	16.4	21.7	29	19	20.42

- 용도별 출현 현황

구 분	항공 보안청	해상 보안청	무선호출	경찰청	미 상	소 계
출현파수(파)	4	5	19	23	3	54
출현건수(건)	12	7	80	32	3	134
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	17.8	19.5	20.9	18.9	20.3	19.48

- 지역별 출현 현황

구 분	포 항	경 주	소 계
출현파수(파)	50	29	79
출현건수(건)	74	60	134
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	19.9	20.5	20.2

□ 서해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 목포, 진도
- 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	130MHz	140MHz	150MHz	160MHz	250MHz
출현과 수 (과)	24	14	37	24	2
출현건 수 (건)	50	26	76	50	3
평균세기(dB μ V/m)	18.4	15.8	19.2	18.6	23.4
구 분	260MHz	270MHz	280MHz		소 계
출현과 수 (과)	1	22	14		138
출현건 수 (건)	1	25	18		249
평균세기(dB μ V/m)	23.2	24.5	23.4		20.8

- 지역별 출현 현황

구 분	목 포	진 도	소 계
출현과수(과)	103	35	138
출현건수(건)	213	36	249
평균세기(dB μ V/m)	20.2	14.8	17.5

□ 3사분기 외래전파 유입현황 요소별 종합 분석 결과

동해안 지역에서는 9과 44건의 외래전파가 유입되어 1사분기 조사결과보다 1과 증가한 것으로 나타났으며, 대역별로는 240MHz, 250MHz 대역은 증가한 반면, 260MHz, 280MHz 대역은 감소했으며, 450MHz 대역에서는 신규 전파가 유입되었다. 그림 2-5 2-6은 대역별 출현현황과 전파세기를 1사분기와 비교하여 검토한 것이다.

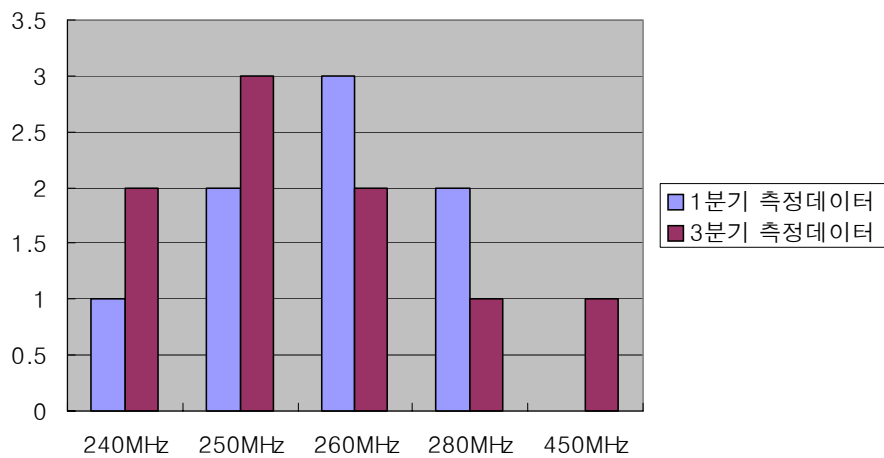


그림 2-5 1분기와 3분기 측정데이터의 주파수 대역별 비교 현황

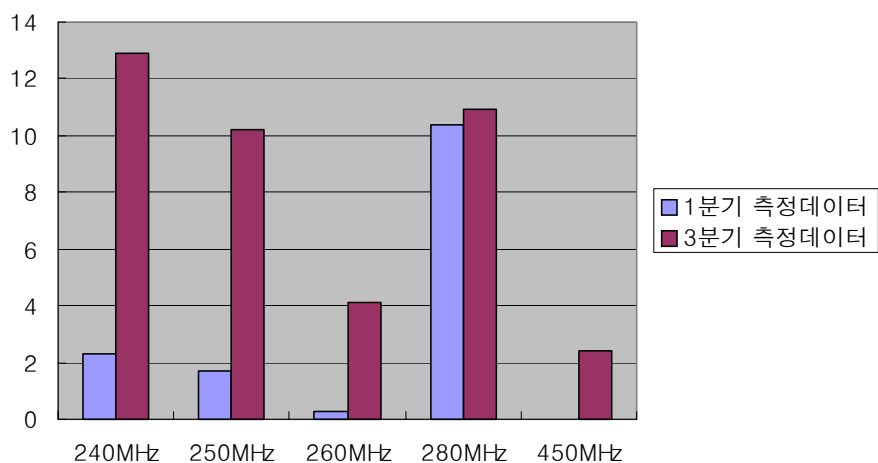


그림 2-6 1분기와 3분기 측정데이터의 전파세기별 비교 현황

평균 전파수신 세기는 혼신발생 가능 최저수신세기 $7.0\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 보다 높은 $9.0\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 으로 조사되었으며, 1분기 $1.3\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 대비 7.7dB 가 증가한 것으로 판단된다. 대역별로는 240MHz 대역이 $12.9\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 으로 가장 높은 수치를 보였으며, 280 , 250 , 260MHz 대역 순으로 나타난 반면 신규로 조사된 450MHz 대역은 $2.4\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 으로 최저수치를 기록하였다. 특히 240 , 250MHz 대역은 지난 1분기 대비 10.6dB 와 8.5dB 의 증가수치를 보여, 계절적 영향에 가장 민감한 것으로 분석되었다. 국가별 출현현황은 전체 9과 중 일본 7과, 러시아 2과로 조사되어, 1분기 대비 일본전파는 2과 증가하고 러시아 전파는 1과 감소로 나타났다.

용도별로는 일본의 항공과 무선평출이 각각 3과였으며, 러시아 방송, 일본 해상이동이 1과로 조사되었으며, 1분기 조사에서 최초로 국내유입이 확인된 러시아 방송신호 3과 중 2과는 지속적 유입이 확인되었으나 1과(266.9625MHz)는 유입되지 않았다. 평균 전파세기는 일본 해상이동이 $15.5\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 으로 가장 강한 것으로 조사되었으며 일본 항공, 무선평출, 러시아 방송 순으로 나타났다. 1분기 대비로는 일본 항공(240 , 250MHz 대역)이 9.0dB 증가하여 가장 높은 증가수치를 보였다.

남해안 지역의 포항, 경주 지역에서는 3분기 측정기간 동안 총 53과 134건의 외래전파가 유입되었으며, 지역별로는 포항이 50과 74건으로 경주의 29과 60건보다 약간 높게 나타났다. 전파의 세기는 포항 $19.9\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 으로 경주 $29.6\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 와 비슷한 전계강도를 보이고 있다.



그림 2-7 3분기 용도별 외래전파 유입 현황

그림 2-7은 용도별 유입현황을 나타낸 것으로 전파환경이 조사지역에 따라 다소 차이가 있겠지만 무선폭출 주파수는 지역에 관계없이 출현하고 있는 것으로 조사되었으며, 유입건수도 80건으로 가장 높게 나타났다. 전년도에 출현된 중국 FM 방송파와 국내중요통신망에 혼신을 발생시킨 중국의 무선폭출주파수 147.725MHz는 금번 조사시 유입되지 않았는데 이는 측정 계절은 같으나 날씨와 온도 등에 의한 영향으로 판단된다. 전년도 동일지역 일본전파 자료조사시 무선폭출 및 경찰청 주파수의 유입이 많았으나 금번 조사에서는 전년도에 비해 137파 감소하였는데, 이것은 무선폭출의 경우 사용인구 감소, 경찰청 주파수의 경우 전계강도를 낮추어 사용하며 또한 조사기간 중 기상상태 불량 및 기온하강의 영향 때문으로 사료된다. 포항과 경주지역은 동해의 전방이 일본으로부터 개방된 해상지역이라 일본전파가 직선으로 유입되고 있으며, 일본전파의 유입경로는 지역적으로 다소 차이가 있겠으나 포항, 경주 조사지역에서 일본방향 130~180도의 방향에서 전계강도가 가장 강하게 유입되었고 일본전파의 송신 예상지역은 九州 부터 本州지역에 도래한 무선국의 일본 주파수가 국내에 유입되고 있는 것으로 판단된다.

서해안 지역인 목포, 진도에서는 총 138파 249건의 외래전파가 유입되었으며, 신호의 대부분이 중국 무선폭출신호로 나타났다. 신호의 특성은 지난 분기 조사 때보다 신호의 명료도는 높아져 가청은 용이했으나, 신호의 세기는 미약하였다. 그리고 주파수 대역은 130 ~ 280MHz 대역으로 300MHz 이상의 대역에서는 출현하지 않았다. 그림2-7은 3분기 지역별 유입현황으로 목포지역에서 중국무선폭출신호가 가장 많이 유입된 것으로 나타났다.

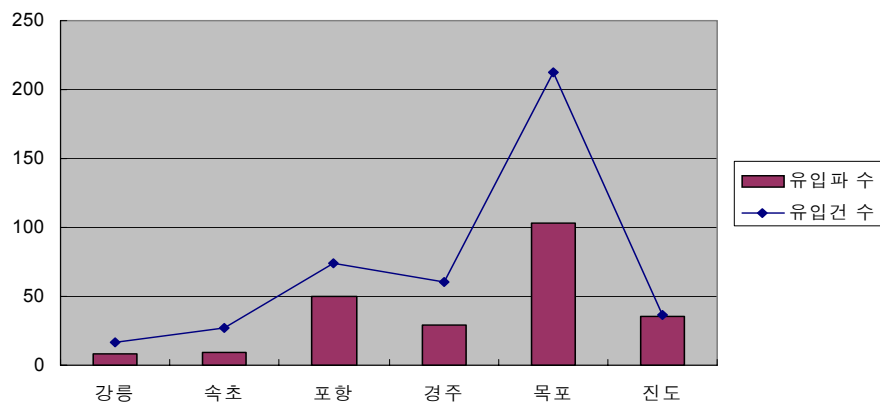


그림 2-8 3분기 지역별 외래전파 유입현황

4. 4사분기 외래전파 유입현황 측정 결과 분석

□ 서해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 강화, 인천, 완도, 여수
- 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	130MHz	150MHz	160MHz	250MHz
출현파 수 (파)	10	17	1	6
출현건 수 (건)	19	52	2	21
평균세기(dB μ V/m)	11.8	7.9	11.1	12.1
구 분	260MHz	270MHz	280MHz	소 계
출현파 수 (파)	2	2	2	40
출현건 수 (건)	4	2	2	102
평균세기(dB μ V/m)	13.2	11.3	12.3	11.3

- 지역별 출현 현황

구 분	강 화	인 천	여 수	완 도
출현파수(파)	7	9	22	13
출현건수(건)	21	22	36	23
평균세기(dB μ V/m)	5.3	7.3	12.5	12.2

□ 남해안 지역 측정 결과

- 측정 조사 지역 : 울산, 진해
- 주파수 대역별 및 지역별 출현 현황

구 분	250MHz	260MHz	270MHz	280MHz	310MHz
출현파 수 (파)	6	1	1	10	1
출현건 수 (건)	12	2	2	49	1
평균세기(dB μ V/m)	19.5	19	19	26.8	21
구 분	330MHz	350MHz	450MHz	810MHz	소 계
출현파 수 (파)	1	6	1	5	32
출현건 수 (건)	1	20	1	8	96
평균세기(dB μ V/m)	26	30.3	34	23.7	24.3

- 용도별 출현 현황

구 분	미상전파	무선호출	해상보안청	고정, 이동
출현파 수 (파)	7	11	5	1
출현건 수 (건)	11	52	17	1
평균세기(dB μ V/m)	20.2	26.2	32	34
구 분	CRP	항공보안청	해상이동	소 계
출현파 수 (파)	5	2	1	32
출현건 수 (건)	8	4	3	96
평균세기(dB μ V/m)	23.7	18.5	20.6	25

- 지역별 출현 현황

구 분	진 해	울 산	소 계
출현과수(과)	23	19	42
출현건수(건)	56	40	96
평균세기($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	28.4	22.5	25.45

□ 4분기 외래전파 유입현황 요소별 종합 분석 결과

4분기 측정 조사에서 강화, 인천 등 경기도 지역과 여수, 완도 등 전라남도 지역에서는 총 40과 102건의 외래전파가 유입되었으며, 주파수 대역은 130 ~ 280MHz 대역의 중국 무선표출신호 주로 유입되었다. 특히 150MHz 대역의 신호가 많이 출현하였으며, 지역별로는 여수지역이 타 지역보다 외래전파 유입량이 많았다. 울산, 진해 등 남해안 지역에서는 총 32과 96건의 외래전파가 유입되었으며, 주파수 대역은 250MHz ~ 810MHz 대역으로 일본 무선표출, 해상보안청, 해상이동, 자동차 전화, 항공보안청 등 다양한 대역에서 외래전파가 출현하였다.

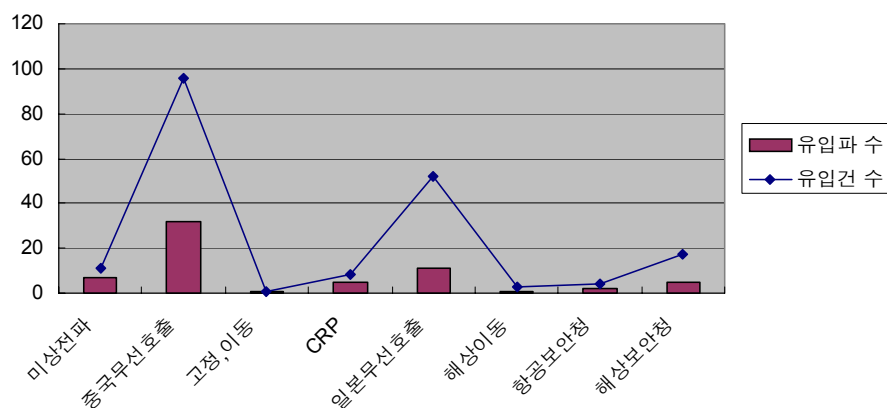


그림 2-9 4분기 용도별 외래전파 유입 현황

그림 2-9 용도별 외래전파 출현현황을 나타낸 자료로서 서해안에 유입된 중

국무선호출 신호가 가장 많이 유입된 것을 볼 수 있다. 그리고 일본 무선표출 신호도 남해안 지역에서 가장 많이 유입되어 전체 외래전파 유입량 중에서 무선표출신호가 유입과 수 기준으로 70.8%, 유입건 수 기준으로 77.7%를 차지하고 있어 무선표출 신호대역에 대한 국내전파환경 보호가 시급히 요구되고 있다. 또한 일본 항공보안청, 해상보안청, 자동차 전화 신호 대역도 매년 꾸준히 유입되고 있어 이 대역에 대한 전파간섭 방지 대책도 필요하다고 판단된다.

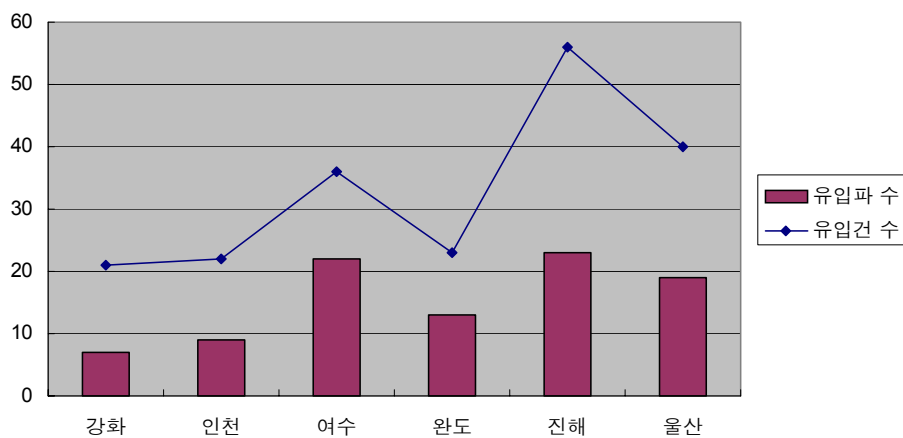


그림 2-10 4분기 지역별 외래전파 유입 현황

그림 2-10은 4분기 지역별 외래전파 유입현황을 나타낸 자료로서, 동일한 기간에 측정 조사한 경우 진해 23과 56건, 여수 22과 36건으로 타 지역에 비해 외래전파 유입이 많은 것으로 나타났다. 지역별로는 다소 전파환경의 차이가 있겠지만, 인접국과의 거리, 기상상태 등을 고려할 때 외래전파 유입이 많은 지역에 대한 집중적인 전파환경 보호 대책이 필요하다고 사료된다.

제 3 절 외래전파 유입현황 년도별 비교분석

1. 주파수 대역별 외래전파 유입현황 분석

□ 동·남해안 지역 유입현황 분석 결과

주파수 (MHz)	130	240	250	260	270	280	290
2000년	-	1	-	-	-	38	1
2001년	-	6	27	7	-	34	5
2002년	2	2	17	5	3	22	-
'01&'02 증감	▲ 2	▼ 4	▼ 10	▼ 2	▲ 3	▼ 12	▼ 5
주파수 (MHz)	300	310	330	350	360	370	380
2000년	-	-	-	43	-	-	-
2001년	1	-	-	78	7	1	13
2002년	-	3	2	45	1	-	2
'01&'02 증감	▼ 1	▲ 3	▲ 2	▼ 33	▼ 6	▼ 1	▼ 11
주파수 (MHz)	390	400	430	450	460	810	소 계
2000년	-	-	-	-	-	10	93
2001년	7	1	1	28	1	19	236
2002년	1	-	-	5	1	12	123
'01&'02 증감	▼ 6	▼ 1	▼ 1	▼ 23	0	▼ 7	▼ 113

□ 서해안 지역 유입현황 분석 결과

주파수 (MHz)	130	140	150	160	170	250	260	270	280	320	소 계
2000년	18	14	64	2	-	-	-	6	3	-	107
2001년	24	23	61	45	1			30	19	1	204
2002년	36	15	48	24	-	7	4	27	17	-	178
'01&'02 증감	▲ 12	▼ 8	▼ 13	▼ 21	▼ 1	▲ 7	▲ 4	▼ 3	▼ 2	▼ 1	▼ 26

2. 용도별 외래전파 유입현황 분석

□ 동·남해안 지역 유입현황 분석 결과

구 분		경찰	무선호출	해상	항공	건설	철도	CRP	이동	고정	기타	계
2000년	이동조사	26	38	11	5	2	1	10	-	-	-	93
2001년	이동조사	53	28	11	13	5	2	19	19	31	29	210
	고정조사	8	19	8	16	-	1	1	-	-	-	53
	유 입 파	54	34	14	28	5	2	19	19	32	29	236
2002년	이동조사	33	23	14	18	1	1	12	2	-	3	123
'01&'02 대비 증감		▼21	▼11	0	▼10	▼4	▼1	▼7	▼7	▼32	▼26	▼113

□ 서해안 지역 유입현황 분석 결과

구 분	2000년도	2001년도	2002년도	'01&'02 대비 증감
중국 무선호출 신호	107	204	178	▼26

3. 수신세기별 외래전파 유입현황 분석

□ 2002년도 수신세기 분석 결과

구 분	10dB μ V이하	11-20dB μ V	21-30dB μ V	31-40dB μ V	41dB μ V이상	소 계
동·남해안	4	58	35	17	9	123
서해안	8	92	67	11	-	178

□ 용도별 수신세기 분석 결과

구 분		해상보안	일본무선호출	CRP	경찰청	항공보안	중국무선호출
2000년	평 균	31.0	22.6	26.9	23.0	1.4	3.16
	최 대	60.0	52.0	36.0	40.0	30.0	26.8
2001년	평 균	24.7	15.3	25.7	16.4	9.7	16.6
	최 대	65.0	52.0	46.0	42.0	35.0	41.2
2002년	평 균	31.7	28.8	30.4	19.2	21.9	20.1
	최 대	61.0	52.0	40.0	24.0	40.0	35.5

4. 지역별 외래전파 유입현황 분석

구 분	동해	삼척	거제	통영	보령	군산	평택	안산
2000 년도	-	-	75	40	37	-	-	-
2001 년도	-	-	85	39	142	2	-	-
2002 년도	7	5	49	37	12	12	14	12
구 분	울진	영덕	부안	영광	강릉	속초	포항	경주
2000 년도	26	11	-	-	-	-	-	-
2001 년도	32	137	79	-	-	-	126	32
2002 년도	14	15	4	6	14	9	50	29
구 분	목포	진도	강화	인천	울산	진해	여수	완도
2000 년도	-	35	24	-	-	-	-	-
2001 년도	-	-	75	-	15	34	-	-
2002 년도	103	35	7	9	19	23	22	13

5. 종합 분석 결과

2002년도 인접국 외래전파 유입현황을 조사하기 위하여 중앙전파관리소 이동측정 데이터를 사용하여 분석하였다. 주파수 대역별로 분석한 결과 동·남해안 지역에서는 2001년도에 240MHz ~ 810MHz 대역에서 236파가 유입된 반면, 2002년도에는 130MHz ~ 810MHz 대역에서 123파가 유입되었으며, 서해안 지역에서는 2001년도에 130MHz ~ 320MHz 대역에서 204파가 유입된 반면, 2002년도에는 130MHz ~ 280MHz 대역에서 178파가 유입되었다. 국내 해안 지역에서 작년보다 외래전파 유입이 적어진 것은 작년은 이동조사, 고정조사 데이터를 종합하여 분석한 결과이고 금년은 이동조사 데이터만 분석에 사용하였기 때문이다. 따라서 경년별 정량적인 비교는 불가능한 상황이지만, 전체 유입현황과 주파수 대역별, 용도별, 지역별 외래전파 유입 흐름은 분석할 수 있었다.

주파수 대역별 분석에서는 2001년도에 남해안 지역에서 출현하지 않았던 130MHz, 270MHz, 310MHz, 330MHz 대역의 신호가 신규로 유입되었으며, 작년에 유입되었던 290MHz, 300MHz, 370MHz, 400MHz, 430MHz 대역에서는 금년에 유입되지 않은 것으로 조사되었다. 또한 250MHz, 280MHz, 350MHz, 810MHz 대역에서는 작년에 이어 지속적으로 외래전파가 많이 유입되고 있는 것을 볼 수 있으며, 특히 국내 전파환경에 혼신을 야기 시켰던 810MHz 대역에서의 신호도 지속적으로 유입되고 있었다. 서해안 지역에서는 중국무선호출 신호인 130MHz ~ 280MHz 대역에서 불규칙적인 신호가 지속적으로 유입되었으며, 2000 ~ 2001년도에 유입되지 않았던 250MHz, 260MHz 대역에서 새로운 신호가 유입되었다.

유입된 외래전파의 수신세기별 분석에서는 혼신발생 가능 수신세기를 7.0 dB μ V로 볼 때 유입신호가 10dB μ V 이하인 미약한 신호는 전체 301파 중 12파 정도이고 유입신호의 50% 정도가 11 ~ 20dB μ V 정도의 세기를 보였으며, 41dB μ V 이상에서도 9파가 발견되었다. 지역별로는 거제, 통영, 포항, 목포, 진도 등에서 일본 및 중국 전파가 다양한 대역별로 유입되는 것을 볼 수 있으며, 조사 지역에 따라 전파환경이 다소 차이는 있겠지만 국내 해안 지역 대부분에서 외래전파가 유입되고 있는 것을 파악하였다.

용도별로는 일본 경찰청, 무선호출, 해상, 항공, 건설, JR철도, CRP 등의

신호가 동남해안 지역에 지속적으로 출현하고 있었으며, 특히 일본 경찰청, 무선호출, 해상, 항공, CRP 등의 신호는 유입량이 타 대역에서보다 높은 것으로 분석되었다. 또한 무선호출 신호는 지역에 관계없이 광범위하게 출현하고 있으며, 일본 해상보안 대역에서는 금년조사에서 최대 61dB μ V 신호가 유입되어 국내 전파환경에 유해한 간섭 가능성을 내포하고 있었다.

따라서 인접국가로부터 유해한 전파간섭 현상을 분석하고 효과적으로 대응하기 위해서는 비정상적으로 유입되는 외래전파의 주파수 대역, 전파 세기에 대하여 여러 가지 변화요소를 포함하는 다양한 분석이 수반되어야 하며, 국내 해안지역에서 인접국과의 거리, 기상상태, 지역별 전파환경의 차이 등을 고려할 때 외래전파의 유입이 많은 지역에 대한 집중적인 전파환경 보호 대책이 요구된다. 또한 국내 통신망에 미치는 유해요소를 추출하여 국가 주파수 자원을 보호할 수 있는 전파간섭 및 혼신 경감 대응책이 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

제 3 장 주요 전파간섭 메카니즘 검토

여기서는 ITU-R 권고안을 중심으로 전파간섭을 일으킬 수 있는 주요 메카니즘을 검토하고 중국이나 일본의 VHF/UHF 대역 전파가 국내 통신망에 영향을 줄 수 있는 전파전파(wave prapagation) 메카니즘이 무엇인지를 알아보려고 한다.

제 1 절 주요 전파간섭 메카니즘

ITU-R P452-10 권고안에서는 10,000km 이하의 거리에서 0.7GHz~30GHz 주파수를 공유하여 사용하는 무선국간에 전파간섭을 일으킬 수 있는 주요 메카니즘을 그림3-1, 그림3-2에서와 같이 6가지로 분류하고 있다.

1. 가시경로 (line-of-sight)

무선국간 전파가 전달될 수 있는 가장 직접적인 방법은 정상대기 조건(normal atmosphere condition) 하에서의 가시경로(line-of-sight) 통신이다. 정상대기란 고도에 따라 대기굴절율이 118M/Km로 감소하는 대기조건을 말하며 이에 대한 세부 내용은 제 4장에서 다룬다. 즉 동일한 주파수 대역에서 서로 다른 종류의 서비스를 이용하는 무선국간에 가시경로가 확보되는 경우 전파간섭을 일으킬 수 있는 가능성을 항상 내포하게 된다.

한편, 동일 서비스 무선국간에 가시경로 통신을 통하여 통신 채널을 확보하고 있더라도 부 경로 회절(subpath diffraction)이나 다중경로(multipath) 형성 등의 영향으로 신호레벨에서 간섭 현상이 발생할 수 있다. 즉 가시경로가 확보되는 상황에서도 부경로 회절 효과에 의해 수신 신호레벨에서 경미한 증감이 발생할 수 있으며 이러한 상황은 간섭현상 분석을 매우 복잡하게 만드는 요인이 된다. 한편 경로 길이가 5km이상인 거의 모든 실제 통신망 상황에서는 대기의 층상화 현상에 의해 송수신기간에 다중경로(multipath)가 형성되거나 초점 현상(focusing effect)이 발생하게 되며 이로 인해 짧은 시간 간격에서 볼 때 상당히 높은 세기로 신호레벨 세기가 증가할 수 있다.

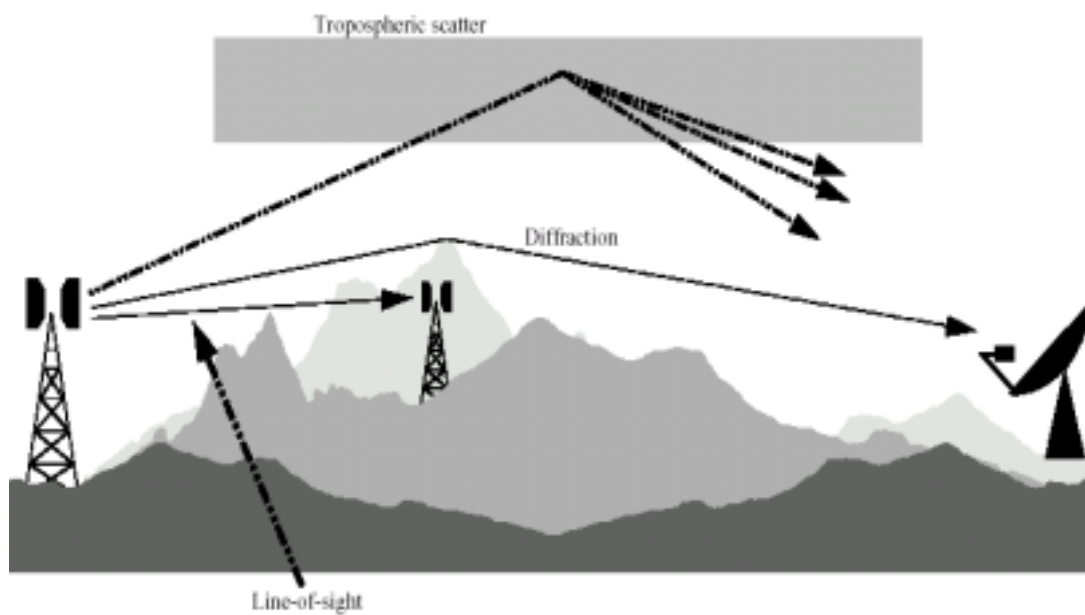


그림3-1 장기간 전파간섭 메카니즘

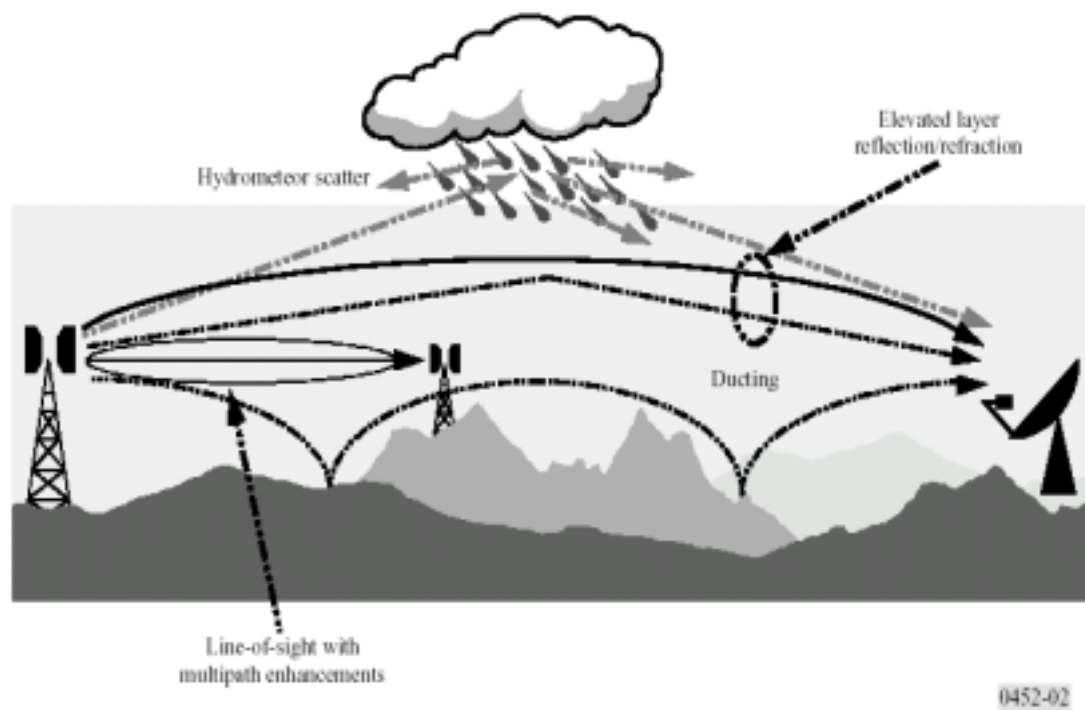


그림3-2 단기간 전파간섭 메카니즘

0452-02

2. 회절(diffraction)

회절이란 전파가 방해물을 만났을 때 방해물의 뒷부분에까지 돌아서 도달하는 파의 일반적인 특성을 말한다. 따라서 정상 대기상태 하에서 송수신기 시스템간에 가시경로(line-of-sight)를 확보하지 못하는 상황에서도 전파는 회절현상에 의해 수신기에 상당한 세기의 신호 레벨을 전송할 수 있다. 간헐적으로 짧은 시간동안 발생하는 전파간섭 현상이 그다지 문제가 되지 않은 종류의 통신서비스에서는 회절을 모델화 하는 정밀도 정도에 의해 기지국 밀도가 결정된다. 이때 회절을 예측하기 위한 모델은 평탄지표나 개별 건축 방해물 등 다양한 지형상황에 충분히 대처할 수 있도록 해야 한다.

3. 대기 산란(tropospheric scatter)

전파(wave)가 대기 중을 전파(propagation)할 때 전파 에너지의 일부는 대기를 구성하는 원자나 분자가 유도전기쌍극자(induced electric dipole)을 형성하는데 이용된다. 이렇게 유도된 유도전기쌍극자는 전파의 진동수와 동일하게 유도전기쌍극자의 극성이 바뀌면서 진동하게 되며 그 결과 진동하는 유도전기쌍극자는 전파를 발생하게 되며 전파를 사방으로 방출한다. 이와 같은 물리적 현상을 산란(scattering)이라 한다.

이러한 대기산란에 의해 전달되는 전파의 세기는 매우 약하며 회절에 의한 전파전달 현상이 매우 약하게 되는 장거리(100~150km이상)에서 대기권 산란 효과는 실제 수신시스템에서 배경 간섭 신호레벨(background interference level)을 나타내는 정도에 불과하다. 따라서 민감한 기지국간 통신을 하는 특수한 경우를 제외하고는 대기산란에 의한 간섭은 신호세기가 너무 약하므로 통상적으로 무시한다.

4. 표면 덕팅(surface ducting)

일반적으로 전파는 대기 중에서 사방으로 자유로이 진행할 수 있다. 그러나 대기구조가 특이하게 분포하는 경우 진행 전파는 특정한 높이의 대기층에 가두어져 장거리를 전파하게 되는데 이 층을 라디오 덕트층이라 한다. 라

디오 덕트 형성과 관련한 상세한 설명은 제 4장에서 다룬다.

표면 덕팅이란 덕트층이 지표면에 인접해 있어 지표면과 덕트층 사이에서 전파가 갇힌 채 장거리를 전파(propagation)되는 현상을 말한다(그림3-3 참조). 즉 표면덕트에 포획(trap)된 전파는 지표면(혹은 해수면)과 덕트층 사이에서 계속 반사하며 장거리를 전파하게 된다. 이러한 표면덕트 현상은 해상이나 해안 지역에서 가장 중요한 단기간 전파간섭 메카니즘으로 작용하고 있으며 500km 이상 떨어진 거리에서도 상당한 세기의 신호레벨을 나타낼 수 있다. 표면덕트 내에서 신호세기는 자유공간에서의 신호세기보다 높은 값을 나타낼 수 있다.

5. 상층 반사 및 굴절 (elevated layer reflection and refraction)

라디오 덕트층이 지상에서 수백 m(혹은 1km 이상) 높이에 형성된 경우 전파에너지의 일부는 일정한 높이의 공기층에 포획(trap)된 상태로 먼 거리를 전파하게 되는데 이를 상층 덕트라 한다(그림3-3 참조).

송수신 거리가 100km를 넘는 경우 지구의 곡률로 인하여 일반적으로 VHF/UHF대역 육상 기지국간에는 가시경로 통신이 불가능하며 회절에 의한 통신이 일부 가능할 수 있다 그러나 송수신 거리가 250~300km이상에 이르는 경우, 회절에 의해 전달되는 전파세기는 너무나 약하게 되어 ITU 권고안에서 일반적으로 회절에 의한 전파간섭 현상은 무시할 수 있도록 하고 있으며 이와 같은 장거리에서 전파간섭을 일으킬 수 있는 주요 메카니즘은 상층덕트에 의한 전파의 반사 및 굴절 현상으로 규정하고 있다.

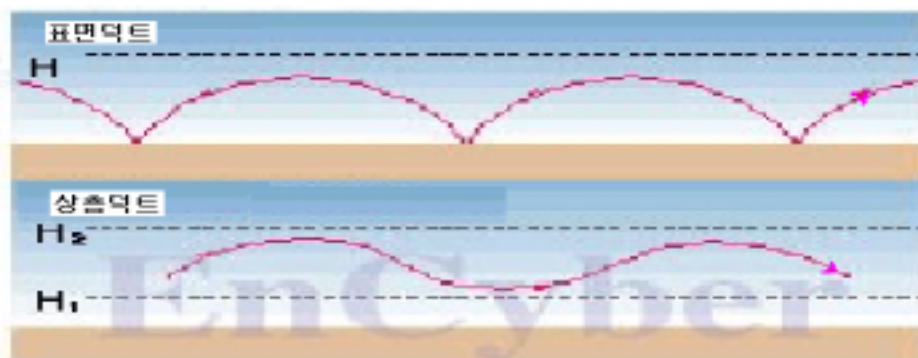


그림3-3 라디오 덕트 종류 (표면덕트, 상층덕트)

6. 강우 산란(hydrometeor scatter)

빗방울 입자는 전파를 산란시키는 또 다른 인자로 작용할 수 있다. 이와같은 강우산란 현상은 주로 지상기지국 송신기와 위성통신의 육상기지국 사이에 간섭을 야기할 수 있는 잠재적 메카니즘으로 평가할 수 있으며 강우산란에 의해 전파(propagation)되는 전파(wave)는 준 등방적(omnidirectional)인 특징을 나타낸다. 그러나 강우산란으로 인한 신호세기는 지극히 약해 일반적으로 강우산란에 의한 전파간섭 현상은 무시할 수 있도록 ITU에서 권고하고 있다.

제 2 절 국내 해안지역 외래전파 유입원인 검토

여기서는 앞 절에서 기술한 주요 전파간섭 메카니즘을 중심으로 250km 이상 떨어진 바다를 통하여 일본이나 중국의 전파가 국내 해안지역에 전파될 수 있는 메카니즘이 무엇인지를 알아본다.

먼저 250km 이상 떨어져 있는 일본이나 중국 해안지역과 국내 해안지역 사이에 가시경로(line-of-sight)가 확보될 수 있는지 여부를 검토하고자 한다. 지구는 반지름(r)이 약 6,370km인 구 형태이며 대기굴절율을 고려한 경우 유효지구반경인자 k 는 4/3이므로 유효지구반경은 약 8,500km에 해당한다. 따라서 전파의 가시거리는 8,500km 반경을 갖는 구에서 수평선(혹은 지평선)에 의하여 제한된다. 그림3-4와 같이 높이 h_1 [m]인 지점에서 높이 h_2 [m]인 곳까지 볼 수 있는 극한 거리 즉, 기하학적 가시거리 d 는 h_1 에서 수평선까지 거리를 d_1 , h_2 에서 수평선까지의 거리를 d_2 라 하면

$$d = d_1 + d_2$$

가 되며 거리(TC)≒거리(AC)≒ d_1 , 거리(RC) ≒ 거리(BC) ≒ d_2 관계가 성립하므로 d_1 , d_2 는 다음처럼 구할 수 있다.

$$d_1 = [(h_1 + r)^2 - r^2]^{1/2}$$

$$d_2 = [(h_2 + r)^2 - r^2]^{1/2} \quad (3-1)$$

(3-1)식에서 송신기와 수신기의 높이인 h_1 , h_2 를 각각 500m로 가정하더라

도 $d_1=d_2 \approx 92.2\text{km}$ 로서 가시거리가 확보될 수 있는 거리는 184.4km 에 불과하게 된다. 그리고 h_1, h_{12} 를 각각 100m 로 가정한 경우 $d_1=d_2 \approx 41.2\text{km}$ 로서 가시거리가 확보될 수 있는 최대거리는 82.4km 에 불과하게 된다. 따라서 실제 송수신 안테나의 높이가 수십~수백m 점을 고려하면 250km 이상 떨어져 있는 한일, 한중간에 전파의 가시경로가 확보될 수 없음은 명백하다.

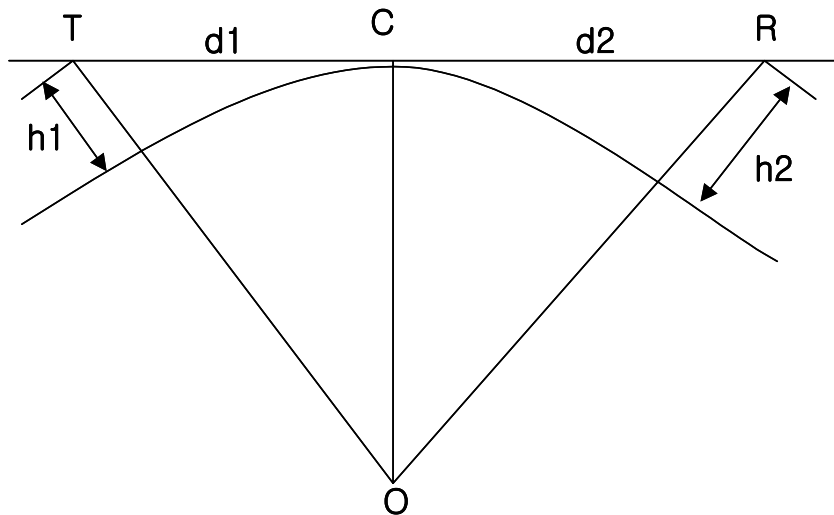


그림3-4 기하학적 가시거리

다음은 회절에 의한 외래전파의 유입 가능성을 검토한다. ITU-R P452-10 권고안에서는 송수신 거리가 250km 이상인 경우 회절에 의해 도달하는 전파세기는 너무 약해 전파 간섭을 야기할 수 있는 요인으로서는 고려하지 않아도 되도록 권고하고 있다. 이를 확인하기 위하여 회절에 의해 전달되는 전파세기를 구해보면 먼저 전파거리 $d=250\text{km}$, $h_1=h_{12}=500\text{m}$, $r=6,370\text{km}$, 유효지구반경인자 $k=4/3$ 을 가정하면 회절이 발생하는 지점 D는

$$D = (2k \cdot r)^{1/2} \cdot (h_1^2 + h_2^2) \quad (3-2)$$

로 구해진다. 2-2식에 의해 회절지점 D를 구해보면 184.4km 가 된다. 이러한 경우 인접국간 거리인 250km 중 184.4km 까지는 자유공간 손실로 계산하고 그 이상에서는 회절에 의한 손실로 계산할 수 있으므로 총 손실은 다음과 같이 주어진다.

$$L_o = L_f(\text{자유공간손실}) + L_D(\text{회절에 의한 추가손실})$$

여기서

$$L_f = 32.4 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log d$$

$$L_D = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \quad (3-3)$$

이다. 주파수 f 를 800MHz로 가정한 경우 $L_f \approx 136\text{dB}$, L_D 는 ITU-R P526 권고안의 표를 참조하면 $L_D \approx 75\text{ dB}$ 로 구해지며 따라서 총 손실 $L_o \approx 211\text{dB}$ 로 주어진다. 따라서 송신기 출력(E.I.R.P)을 60dBm, 수신기 이득을 30dB로 송수신 조건을 가능한 높게 가정하더라도 수신세기는 -121 dBm이하 이므로 실제 수신시스템에 영향을 미치기에는 너무나 미약함을 알 수 있다.

마지막으로 대기나 강우에 의한 산란 효과를 고려할 수 있으나 이에 의한 영향은 너무 약해 실제 수신 시스템에서 배경 잡음(background noise) 정도로 밖에 작용하지 못하므로 전파간섭을 일으키는 요인으로 고려하지 않아도 된다.

한편 라디오덕트에 의한 전파간섭 현상은 ITU-R 권고안에서 기술하였듯이 300km 이상의 거리에서도 통신에 간섭을 일으킬 수 있을 만큼 강한 세기의 전파가 전달된다. 따라서 한일, 한중간 전파간섭 현상을 일으키는 주요 메카니즘은 라디오덕트에 의한 영향으로 볼 수 있다..

지금까지 VHF/UHF 대역에서의 외래전파 유입 원인을 분석해 보았다. VHF/UHF 대역 전파는 전리층에서 반사되지 않고 투과하므로 전리층에 의한 전파 월경은 고려할 필요가 없다. 따라서 전리층을 제외한 가능한 전파전달 메카니즘을 검토한 결과 한일, 한중간 전파간섭현상은 라디오덕트에 의한 영향이라고 볼 수 밖에 없다. 따라서 다음 장에서는 라디오 덕트에 대한 개념과 종류, 그리고 라디오 덕트 내에서의 전파전파 특성 등에 대하여 알아본다.

제 4 장 라디오 덕트(Radio Duct)

라디오 덕트란 일정한 높이의 대기층에 전파에너지의 일부를 가둔 채 작은 손실로 장거리를 전달할 수 있는 전파통로를 말한다. 이러한 라디오덕트는 대기 굴절을 변화로 인해 발생하며 지상 수km 이내의 대류권에서 주로 발생한다. 라디오 덕트는 주파수가 낮은 장파나 중파, 단파 대역보다는 VHF 나 UHF 와 같이 주파수가 높은 대역의 전파를 더 잘 전송할 수 있는 특징이 있다. 따라서 보다 높은 주파수 대역을 이용하는 통신기술이 발전함에 따라 라디오 덕트에 의한 전파간섭 현상은 더욱 심화될 것으로 예상된다.

라디오 덕트는 일반적으로 RF에서 이야기하는 도파관과 동일하게 전파를 한정된 공간에 가두어 일정거리를 전달하는 통로이다. 그러나 일반적으로 RF 도파관은 금속으로 구성된다는 측면에서 라디오 덕트 내에서의 전파의 전달 현상은 RF 도파관보다는 오히려 광섬유 내에서의 광신호를 전송하는 원리와 더 유사하다. 따라서 라디오 덕트에 의한 전파 전달 현상을 분석하기 위하여 일반적으로 광섬유에서 적용되는 도파원리를 이용한다.

제1절에서는 먼저 지구 대기의 구조에 대하여 알아본다. 제2절에서는 대기 굴절을 정의 및 종류 그리고 대기권에서 전파전파의 휨(bending) 현상에 대하여 알아보며 마지막 제3절에서는 라디오 덕트 종류 및 덕트 내에서 전파 특성 등에 대하여 알아본다.

제 1 절 지상대기 구조

지상의 대기 구조는 고도에 따른 온도변화를 기준으로 그림4-1과 같이 대류권, 성층권, 중간권, 열권으로 구분한다. 장파, 중파 및 단파 대역 통신에서 주로 이용하는 전리층은 중간권 일부와 열권 높이에서 형성되어 있는 반면, 여기서 다루는 라디오 덕트에 의한 비정상적인 전파전달 현상은 최하위 층인 대류권에서 형성된다. 그리고 실제로 라디오 덕트층은 지상 수km 이내(주로 2km 이내)에 형성되므로 대류권 중에서도 최하위 층에서 형성된다. 대류권에서는 1km 높이마다 약 6~7도 정도 온도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 전리층이 형성되는 높이에서는 공기의 흐름이 활발하지 못하여 대기를

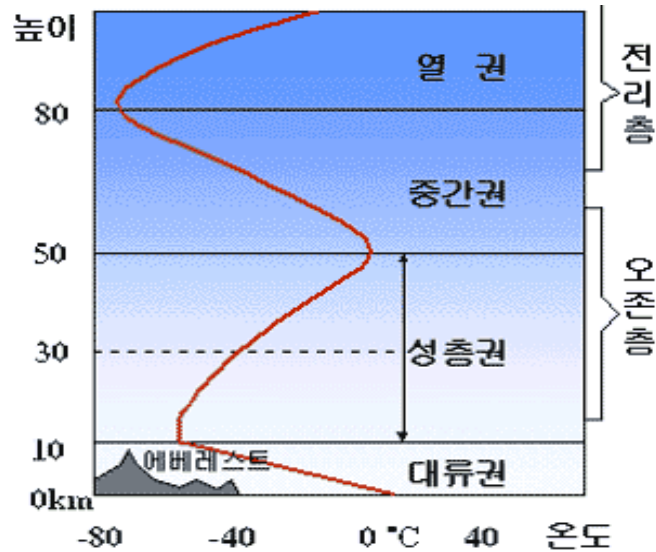


그림4-1 온도변화에 따른 대기권 구분

구성하는 성분이 무게에 따라 층상으로 위치하는 반면 대류권 내에서는 기상변화가 활발하여 대기의 구성성분들이 고르게 잘 섞여 있다.(단 수증기는 예외) 지구상의 지표면에서는 물의 증발현상이 끊임없이 일어나고 있어 대류권내 상층 지역보다는 지표면(특히 해수면)에서의 수증기 농도가 훨씬 높다. 이러한 습도 분포는 일반적으로 고도에 따라 감소한다.

이를 종합해서 정리하면 일반적으로 라디오 덕트가 형성되는 대기권에서는 일반적으로 고도에 따라 기온, 기압, 습도가 감소한다. 그러나 대류권에서는 대기의 순환작용이 활발하여 위에서 말한 일반적인 경향과는 반대의 경우가 종종 발생할 수 있다. 즉 대류작용으로 습한 공기 덩어리가 건조한 공기층 위에 존재할 수도 있고 때로는 고온의 공기덩어리가 저온의 공기덩어리 위에 위치할 수도 있다. 이러한 기온, 기압 혹은 습도의 역전 현상이 발생하는 경우 그 경계 면에서 주로 라디오 덕트층이 형성된다. 라디오 덕트층의 형성 여부는 대기굴절을 변화를 통하여 알 수 있으며 특히 대기굴절율의 급격한 변화가 발생하는 지점에서 라디오 덕트층이 형성된다.

제 2 절 대기굴절율

1. 굴절율 정의

어떠한 매질 내에서 전파의 전달특성은 매질의 굴절율 (refractive index)에 의해 결정된다. 즉 전파가 매질 내에서 얼마의 속도로 어떠한 방향으로 어떠한 곡선을 따라 진행할 것인지 등의 전파전파 특성은 매질의 굴절율 특성에 의하여 결정된다.

매질의 굴절율은 일반적으로 “n”으로 표시하며 다음과 같이 정의한다.

$$n = (\text{진공에서의 전파속도})/(\text{특정 매질에서의 전파속도}) \quad (4-1)$$

즉 굴절율이란 진공 중에서 전파의 속도에 대한 특정매질에서의 전파속도의 비를 말한다. 진공 중에서 전파의 속도는 광속 $C(\approx 30\text{만km/sec})$ 로 일정하며 이때 굴절율을 1로 정의한다. 따라서 어떠한 매질의 전파굴절율이 “2”라는 값을 가진다면 그 매질 내에서 전파는 $C/2(\approx 15\text{만km/sec})$ 의 속도로 전파(propagation)됨을 의미한다. 즉 굴절율이 크다는 것은 상대적으로 매질 내에서 전파의 이동속도가 느려짐을 의미한다.

2. 대기굴절율

대기굴절율이란 전파가 통과하는 매질이 대기일 경우 진공에서의 전파속도에 대한 대기 중에서의 전파속도의 비를 말한다. 따라서 대류권 내에서 전파의 전달 특성을 분석하기 위해서는 먼저 대기의 굴절율을 알아야 한다. 이를 위하여 ITU-R P.453.8에서는 기온, 기압 및 습도를 이용하여 대기굴절율 n 을 구할 수 있는 (4-2)식을 제공하고 있으며 이 식은 이 최대 100GHz 주파수 범위까지 적용되며 그 오차 범위는 0.5% 이하이다.

$$N = (n - 1) * 10^6 = 77.6 / T (P + 4810 * e / T) \quad (4-2)$$

여기서 n : 대기 굴절율(refractive index of the atmosphere)

N : 대기 굴절도(refractivity of the atmosphere)

T : 절대온도(K)

P : 대기압(hPa)

e : 수증기압(hPa)

을 말한다.

(4-2)식에서 수증기압 e는 (4-3)식처럼 상대습도 H로 표현되며 (4-3)식에서 포화수증기압 e_s 는 식(4-4)로 표현된다

$$e = H * e_s / 1000 \quad (4-3)$$

$$e_s = 6.1121 * \exp[17,502 * t / (t + 240.97)] \quad (4-4)$$

따라서 우리는 (4-2), (4-3), (4-4)식으로부터 대기굴절을 n은 온도 T, 기압 P 및 상대습도 H로 구할 수 있음을 알 수 있다.

한편 4-2식에서 우리는 굴절을(refractive index) n과 함께 굴절도(refractivity) N ($= (n-1) * 10^6$)을 정의하고 있다. 굴절을 n 외에도 굴절도 N으로 정의하여 사용하는 이유는 n은 크기가 너무 작아 사용하기 불편하기 때문이다. 일반적으로 대류권에서 고도에 따른 대기의 굴절을 n은 1.000250 ~ 1.000400범위의 값을 가진다. 따라서 대류권에서 굴절을 n의 변화란 통상적으로 0.000150 이내이다. 예를 들어 대기굴절을 n이 0.00003 감소했을 경우 사용하기에도 불편할 뿐만 아니라 굉장히 작은 변화처럼 느껴지지만 굴절도 N으로 환산하면 N 값이 30 감소한 경우가 되어 사용하기가 편하고 동시에 그 변화 정도를 우리는 쉽게 느낄 수 있다. 따라서 라디오 덕트에서는 굴절을 n 보다는 굴절도 N을 보다 많이 사용하고 있다.

한편 대기굴절을 표현할 때 굴절(refractive index) n, 굴절도(refractivity) N과 더불어 수정굴절(refractive index) M을 많이 사용한다. 그리고 실제로 라디오 덕트에서는 대부분 수정굴절 M을 이용하여 라디오 덕트에서의 전파전파 특성을 기술한다. 이때 사용되는 수정굴절 M이란 아래와 같이 정의된다.

$$M = (n + h/a - 1) * 10^6 = N + 10^6 * h/a \quad (4-5)$$

수정굴절 M을 사용하는 이유는 곡률을 가진 실제의 지구 형태를 평판한 지구형태로 변형하여 전파전파 효과를 기술할 수 있는 편리함 때문이다. 예를 들어 송신기에서 수평으로 발사된 전파가 지표방향으로 휘어지면서 진행하는 경우 지구는 실제로 곡률을 가지고 있기 때문에 수신지점에서는 어떠한 방향으로 휘는지를 쉽게 감지할 수 없다. 그러나 수정굴절 M을 도입하여 전파전파 특성을 기술하는 경우 지표면은 평탄한 지구 형태로 바뀌어 표현되므로 전파의 진행방향을 쉽게 알 수 있는 장점이 있다.

3. 전파의 휨현상(ray bending)

앞에서 살펴보았듯이 대기권에서 전파의 진행속도는 대기 굴절율에 의해 결정되며 대기 굴절율이 n 인 경우 전파의 진행속도는 C/n 으로 주어진다.

한편 대기 굴절율이 고도에 따라 변하는 경우 전파는 식 (4-6)으로 주어지는 곡률반경에 따라 휘어지게 된다.

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{\cos \Phi}{n} \frac{dn}{dh} \quad (4-6)$$

ρ : 전파 경로의 곡률 반경(radius of curvature)

n : 대기굴절율(refractive index of the atmosphere)

dn/dh : 굴절율 수직경사도(vertical gradient of refractive index)

h : 지상에서의 높이

Φ : 수평에 대한 전파 진행방향 각도

여기서 곡률은 전파가 지구방향으로 휘어지는 경우를 양으로 가정하였다. 일반적으로 대기굴절율은 고도에 따라 감소한다. 따라서 송신기 전파가 수평 방향으로 발사된 경우 위의 (4-6)식을 참조해 보면 전파는 대기를 통과하면서 지구방향으로 휘어지게 됨을 알 수 있다.

4. 유효 지구 반경(Effective Earth radius)

실제 송신기에서는 수평에 가깝게 전파를 발사한다. 식(4-6)에서 전파의 경로가 거의 수평에 가까운 경우 $\Phi \approx 0$ 으로 가정할 수 있으며 대기의 실제 굴절율 (n)은 1.000250~1.000400 정도의 값을 가지므로 $n \approx 1$ 로 근사할 수 있다. 이렇게 근사할 경우 전파의 휨 현상을 기술하는 식 (4-6)은 다음처럼 단순하게 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{dn}{dh} \quad (4-7)$$

(4-7)식은 대기굴절율 수직경사도가 일정할 경우 전파의 진행경로는 일정한 반경의 원호(arcs of circle)로서 표현될 수 있음을 의미한다. 이것으로부터 우리는 다음을 알 수 있다. 대기 굴절율 기울기가 일정한 경우 실제 지구

상에서 진행하는 전파는 휘어지는 것으로 표현되는데 만일 우리가 기하학적으로 적절히 변형된 좌표계를 도입한다면 전파가 마치 선형으로 직진하는 것처럼 기술할 수 있다는 것이다. 이를 만족할 수 있는 기하학적 변형이란 (4-8)식처럼 실제 지구반경을 유효지구반경으로 수정하여 기술하는 것이다.

$$1/(k*a) = 1/a + dn/dh = 1/Re \quad (4-8)$$

a : 실제지구반경

Re : 유효지구반경

k : 유효지구반경 인자

실제 식(4-8)처럼 기하학적 변형을 도입하는 경우 전파의 진행방향에 무관하게 전파의 진행을 직선으로 표현할 수 있다. 실제 지구상에서 대기굴절율 프로파일은 지수모델(exponential model)로 나타난다. 그러나 지상에서 1,000m까지의 대기굴절율의 경우 선형으로 근사할 수 있으며 이때의 k 값은 평균적으로 4/3를 갖는다. k=4/3인 경우 유효지구반경 Re는 약 8,500km에 해당된다. 그림 4-2에서는 실제 지구표면에서의 전파 진행(a) 경로를 유효지구반경(b)과 수정굴절율 M(c)을 이용하여 전파 진행을 기술하는 경우 편리함을 알 수 있다.

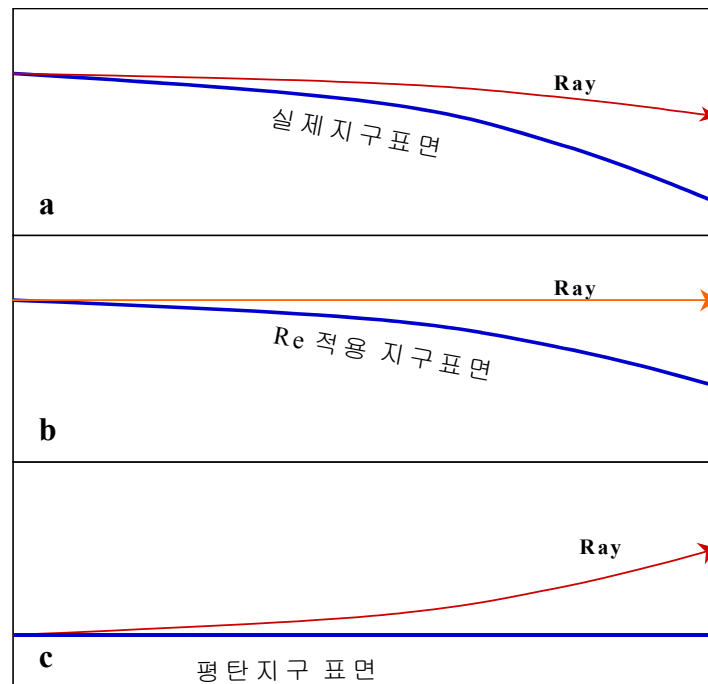


그림4-2 유효지구반경(b) 및 수정굴절율(c)에서의 전파의 진행

제 3 절 라디오 덕트

1. 대기굴절을 구분 및 전파전파 특성

지상에서 고도에 따라 대기 굴절율이 변하는 경우 전파는 4-6 또는 4-7식과 같이 곡률 반경(radius of curvature) ρ 로 휘어지면서(bending) 진행한다. 이때 곡률반경 ρ 는 대기굴절을 변화가 크면 클수록 더욱 작은 곡률반경을 가지게 된다. 여기서 곡률반경 ρ 가 작다는 것은 전파가 급격하게 휘어짐을 의미하며 곡률반경이 크다는 것은 완만하게 휘어진다는 것을 의미한다. 예를 들어 전파의 곡률반경이 무한대(∞)라는 것은 전파가 직진함을 의미한다.

대기권의 대기상태는 고도에 따른 굴절을 변화정도에 따라 표4-1과 같이 표준(standard), 정상(normal), 부굴절(sub-refraction), 초굴절(super-refraction) 및 트래핑(trapping)으로 구분한다. 지구의 대기는 평균적으로 118M/km 굴절을 기울기를 가지는데 이를 표준대기(standard atmosphere)라 한다. 이때의 N 기울기로 -39N/km에 해당한다. 이 표준대기를 포함하여 대기 굴절율이 79~157M/km사이의 값을 가지는 경우(N 기울기로는 -79~0 N/km에 해당) 이를 정상대기(normal atmosphere)라하며 그림4-3에서 보듯이 정상대기의 경우 수평방향으로 송신된 전파는 지구방향으로 휘어지면서 진행하게 되나 지구 자체의 곡률 때문에 지표면에는 도달하지 못하게 된다

한편 M 기울기가 157M/km이상인 경우(N 기울기로 0 N/km이상에 해당) 이를 부굴절(sub-refraction) 상태라 하며, 이 경우 전파는 지표면이 아닌 하늘 쪽으로 휘어지면서 진행하게 된다.

대기굴절율이 0~79M/km인 경우 초굴절(super-refraction) 대기상태라 한다. 이때 전파는 지구방향으로 휘어지면서 진행하기는 하나 역시 정상대기와 동일하게 수평으로 발사된 전파는 지표면에는 도달하지 못한다.

그러나 대기굴절율이 0 M/km보다 작은 값을 가지는 경우 이를 포획(trapping) 대기상태라 한다. 이때 전파는 큰 곡률을 가지면서 지표 방향으로 휘어지게 되며 전파가 휘어지는 곡률은 지구 자체의 곡률보다 크다. 따라서 0 M/km보다 작은 M 기울기 값이 지면까지 계속될 경우 전파는 일정한 거리를 진행하게 되면 지표면에 도달하게 된다, 지표면에 도달한 전파는 지표면에서 반사되어 대기 중으로 전파하게 되지만 0 M/km보다 작은 대기굴절

율로 인해 다시 지표면에 도달하여 되반사를 반복하며 먼 거리를 진행한다. 이와 같이 대기굴절율이 0 M/km보다 작은 층을 덕트층(ducting layer)하며 대기 중에 이 층이 존재하는 경우 라디오 덕트가 형성되었음을 의미하며 덕트층이 형성되는 높이와 M 굴절율값에 따라 덕트는 표면덕트와 상층덕트로 구분한다.

표4-1 수정굴절율 M 기울기와 굴절도 N 기울기 관계

대기굴절 형태	M 기울기 (M/km)	N 기울기 (N/km)
trapping	0 이하	-157 이하
super-refraction	0~79	-157 ~ -79
normal	79~157	-79~ 0
standard	119	-40
sub-refraction	157 이상	0 이상

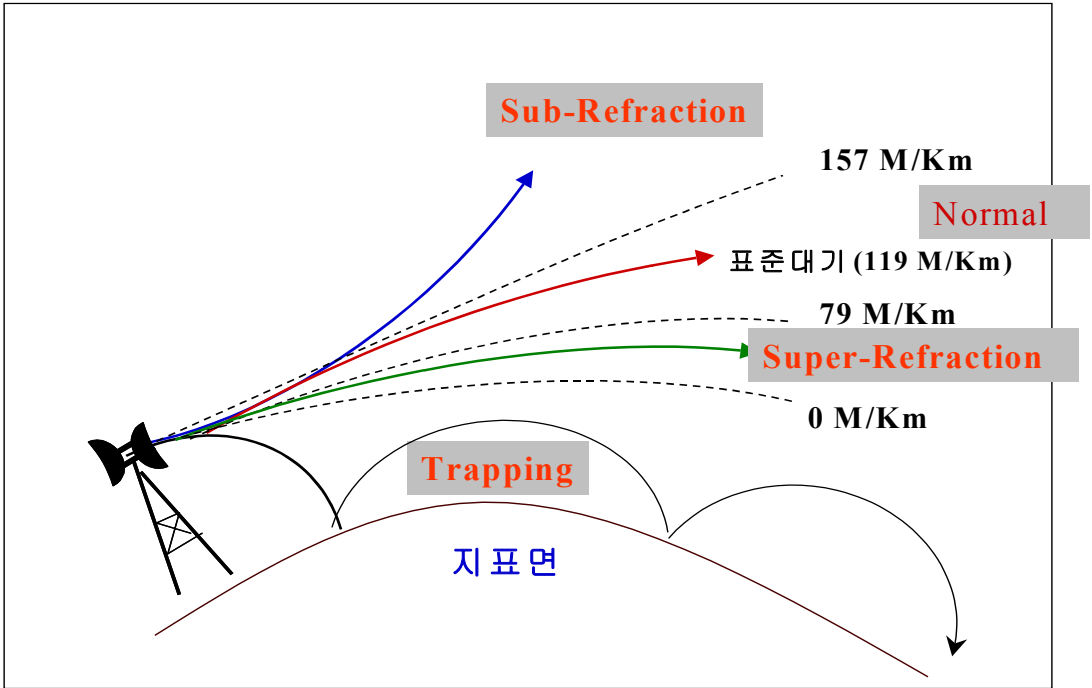


그림4-3 수정굴절율(M) 기울기 변화에 따른 전파전파 특성

2. 라디오 덕트

대기권에서 라디오 덕트층의 존재 유무는 대기굴절율을 M 기울기로 표현하는 경우 0 M/km 보다 작은 부분이 존재하는지 여부로서 결정되며 이를 덕트층(ducting layer)이라 한다. 이와 같이 형성되는 라디오 덕트는 덕트층의 높이와 지표에서의 수정굴절율 M 값에 의해 그림4-4와 같이 표면덕트(surface duct)와 상층덕트(elevated duct)로 구분된다.

1) 표면덕트(surface duct)

지상에서 높이에 따른 대기굴절율 분포를 수정굴절율 M 으로 표현하는 경우 그림 4-4와 같이 덕트층(ducting layer)에서 M 최소 값이 지표에서의 수정굴절율 M 값보다 큰 경우 이를 표면덕트라 한다. 표면덕트가 존재하는 경우 표면덕트에 포획(trap)된 전파는 표면덕트층과 지표면 사이에서 반사되며 먼 거리를 전파하게 된다. 주로 해수면에서 발생하는 수증기에 의해 형성되는 기화덕트(evaporation duct)도 표면덕트의 일종이다.

2) 상층덕트(elevated duct)

그림4-4와 같이 덕트층(ducting layer)이 높은 고도에서 형성되는 경우 덕트층에서의 M 값은 지표에서의 수정굴절율 M 값보다 작은 값을 가지게 된다. 이 때 그림4-4에서 덕트층에서의 M 최소값 높이인 (a)와 동일한 M 값을 가지는 (b)지점 사이를 상층덕트라 한다. 상층덕트가 형성된 경우 덕트층으로 들어온 전파중 일부는 (a)지점에서 반사되어 아래로 향하며 다시 (b)높이에서 되반사되어 먼 거리를 전파하게 된다.

그림4-5에서 표면덕트와 상층덕트내에서의 전파전파 특성을 기술하고 있다. 일반적으로 덕트는 차갑고 습한 공기층 위에 따뜻하고 건조한 공기층이 위치하는 경우 주로 많이 발생하는데 이 경우 덕트층(ducting layer)은 차가운 공기와 따뜻한 공기 층이 만나는 경계면에서 주로 발생한다.

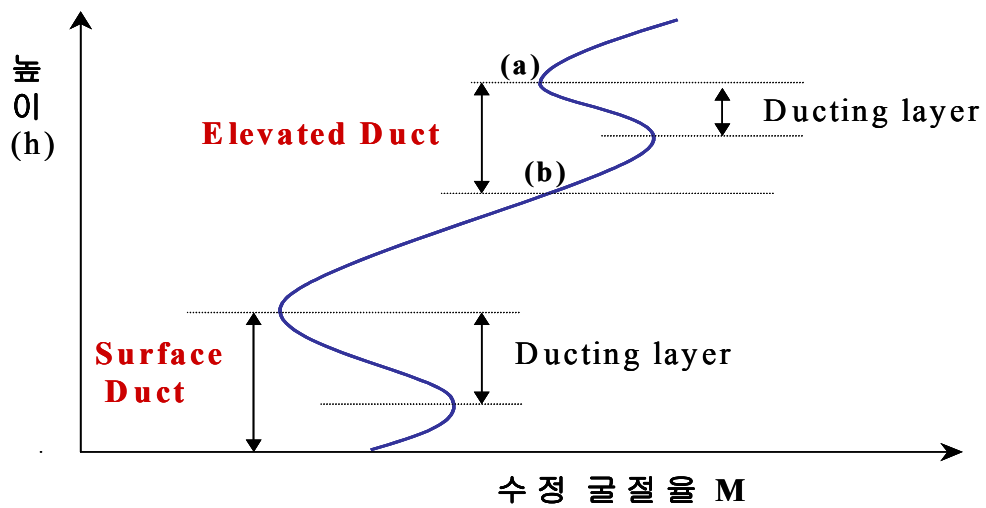


그림4-4 표면덕트(surface duct)와 상층덕트(elevated duct)

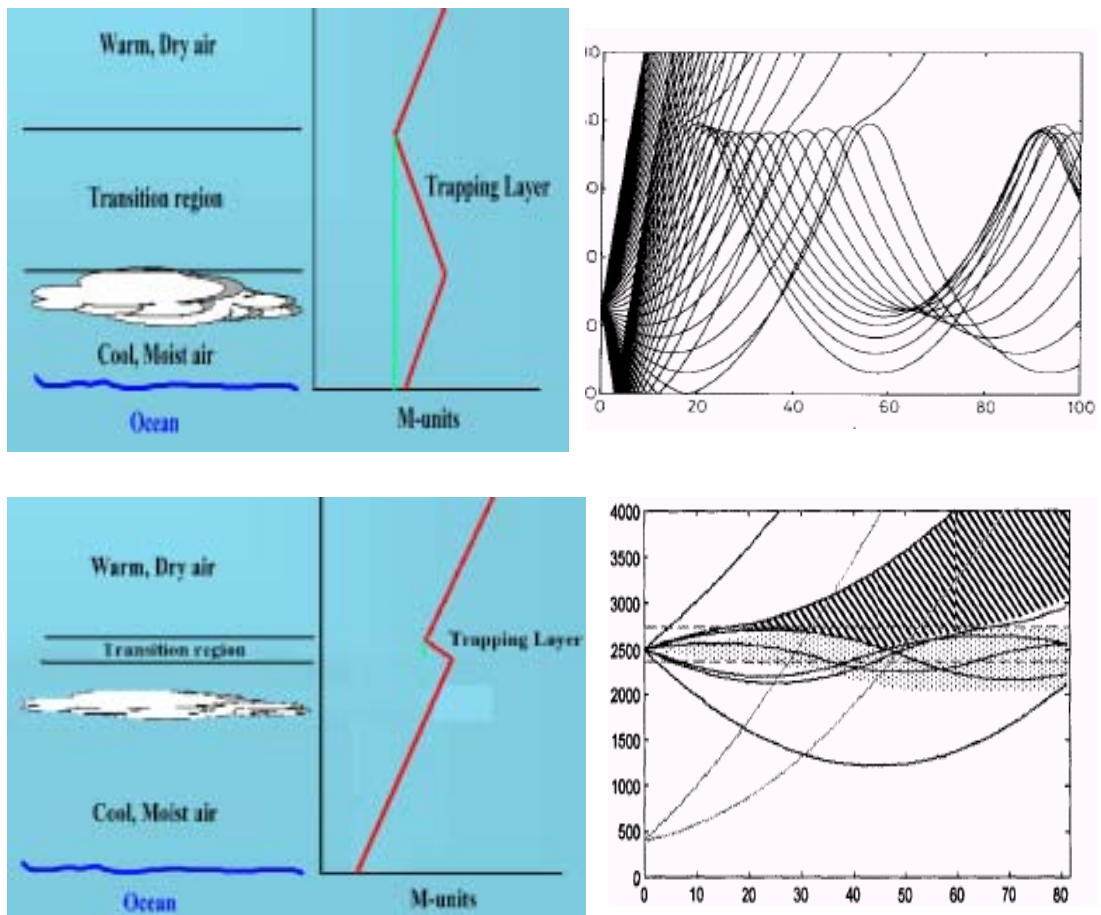


그림4-5 덕트 내에서의 전파전파 특성 비교

제 5 장 포항지역 라디오덕트 특성 및 주요 주파수 대역별 최적 수신 고도 분석

제 1 절 국내 기상자료 분석

1. 포항지역 기상자료 분석

먼저 국내 해안지역에서 대기굴절을 관련 주요인자를 추출하기 위하여 포항 기상대의 고층기상 측정 자료를 이용하였다. 포항 기상대에서는 1980년 이전부터 라디오존데를 이용하여 1일 2회씩(09시 및 21시) 고층기상 상태를 측정하고 있으며 태풍이 발생하거나 기타 기상상태 등에서 중요한 날은 그 중간시간(03시, 및 17시)에도 고층기상 상태를 측정하여 그 결과를 보관하고 있다. 이들 자료중 우리는 3년 간의 자료 (1998, 2000, 2002년)를 분석하여 포항지역의 덕트 종류별 발생 확률, 덕트 두께, 상층덕트 높이 등에 대한 정보를 추출하였다. 1일 2회씩 고층 기상자료를 측정할 경우 3년간 총 측정 자료는 2,190여 개 이상의 대기 굴절정보를 얻을 수 있으나 자료 누락 및 자료 변환과정에서 자료 손실 등으로 인하여 실제 분석에서는 3년간 자료중 1,967 개 기상자료 만을 대상으로 덕트 발생 확률 등 국내 대기굴절을 특성 인자를 구하였다. 우리가 3년간 포항지역 기상자료 분석을 통하여 구한 포항지역의 기상관련 주요 인자는 다음과 같다.

o 표면덕트(Surface duct)관련

- 표면덕트 발생확률
- 표면덕트 강도 [strength, S_s (M-units)]
- 표면덕트 두께 [thickness, S_t (m)]

o 상층덕트(elevated duct)관련

- 상층덕트 발생확률
- 상층덕트 강도 [E_s (M-units)]
- 상층덕트 두께 [E_t (m)]
- 상층덕트 하단 높이 [base height of the duct E_b (m)]
- 상층덕트층 발생높이(-M 기온기값을 나타내는 최초 높이) [E_m (m)]

표5-1 대기굴절을 특성 분석에 이용한 고층 기상 자료

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	총
2002년	64	59	59	64	65	79	81	63	68	27			629
2000년	35	53	62	62	61	61	64	63	61	61	62	59	704
1998년	61	52	64	55	61	59	39	31	41	62	57	52	634
계	160	164	185	181	187	199	184	157	170	150	119	111	1,967

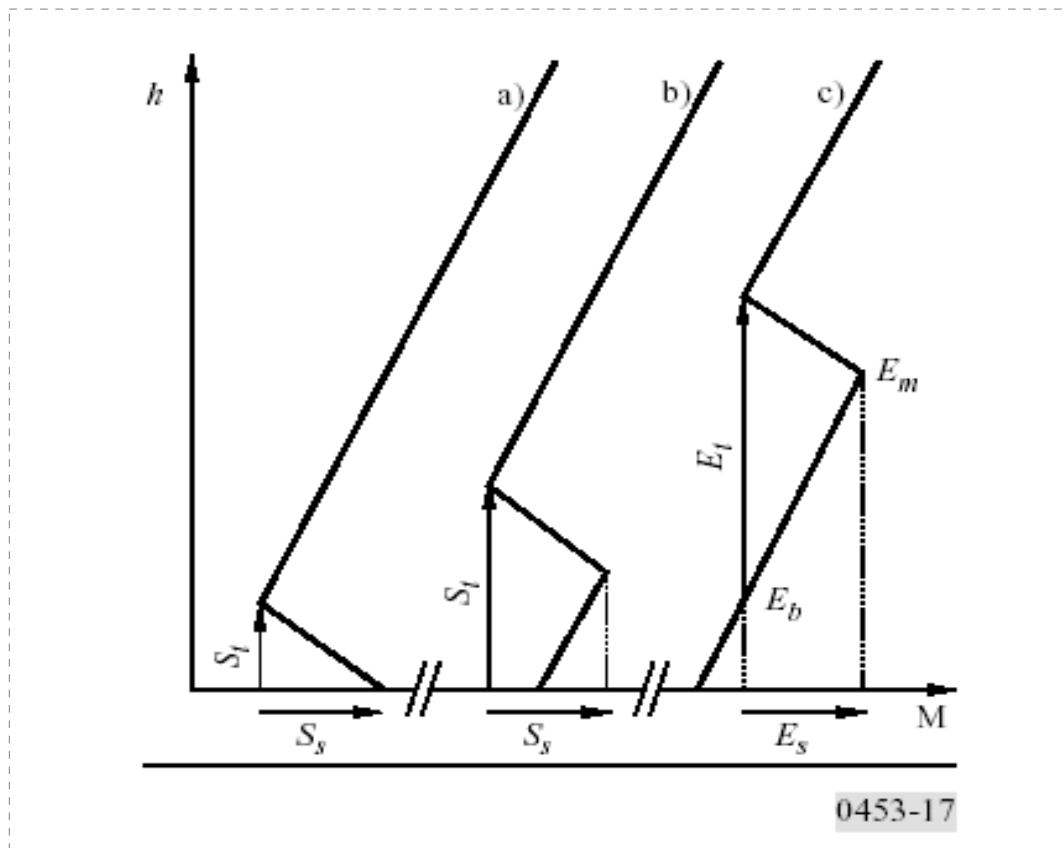


그림5-1 덕트관련 주요 파라메타 정의
(여기서 (a), (b)는 표면덕트를 (c)는 상층덕트를 말함)

가. 덕트 발생 확률

3년간 기상자료를 기준으로 할 때 포항지역에서 표면덕트 발생확률은 23.6%, 상층덕트 발생확률은 36.4%로 나타났다. 그리고 이를 월별로 구분하여 보면 그림5-2와 같이 주어진다. 그림을 보면 표면덕트나 상층덕트 모두 겨울보다는 여름 특히 5~10월사이에 많이 발생함을 알 수 있다. 상층덕트의 경우 여름철인 7, 8월보다는 봄, 가을이 좀 더 높은 덕트 발생확률을 보이고 있다.

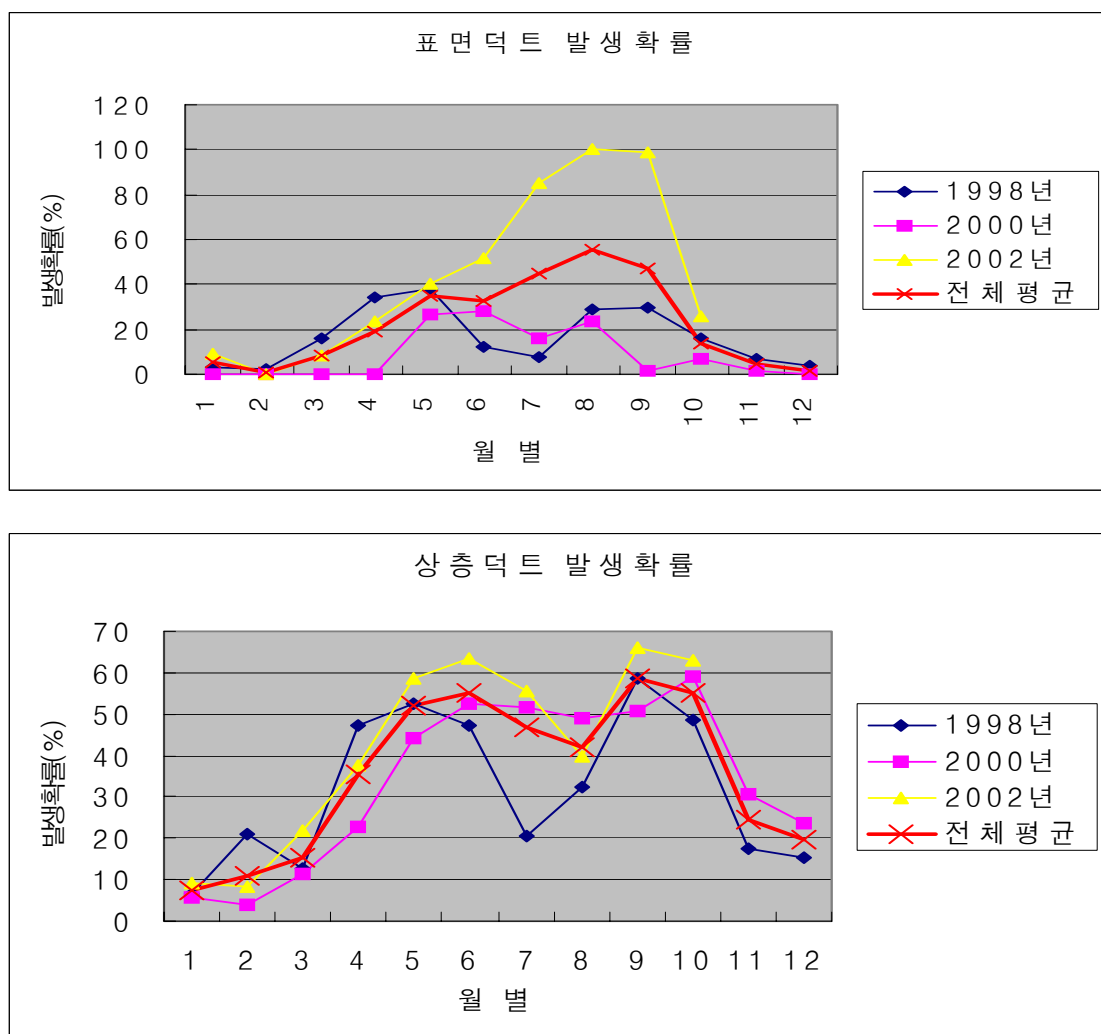


그림5-2 덕트 발생 확률 (월별)

나. 표면덕트 강도 및 두께 (Ss ,St)

포항지역에서의 표면덕트 발생시 덕트강도와 덕트두께는 평균 4.96[M], 47.73m로 나타났으며 월별 특성은 그림5-3와 같이 나타났다. 그림에서 2월과 12월 표면덕트 평균 강도와 평균두께는 다른 달에 비해 크게 나타나는 것처럼 보이는데 이는 실제로 덕트 발생 빈도가 작아(실제로 2월은 1회 발생, 12월은 2회 발생) 월별 평균 특성을 제대로 반영하지 못해 나타난 결과이다.

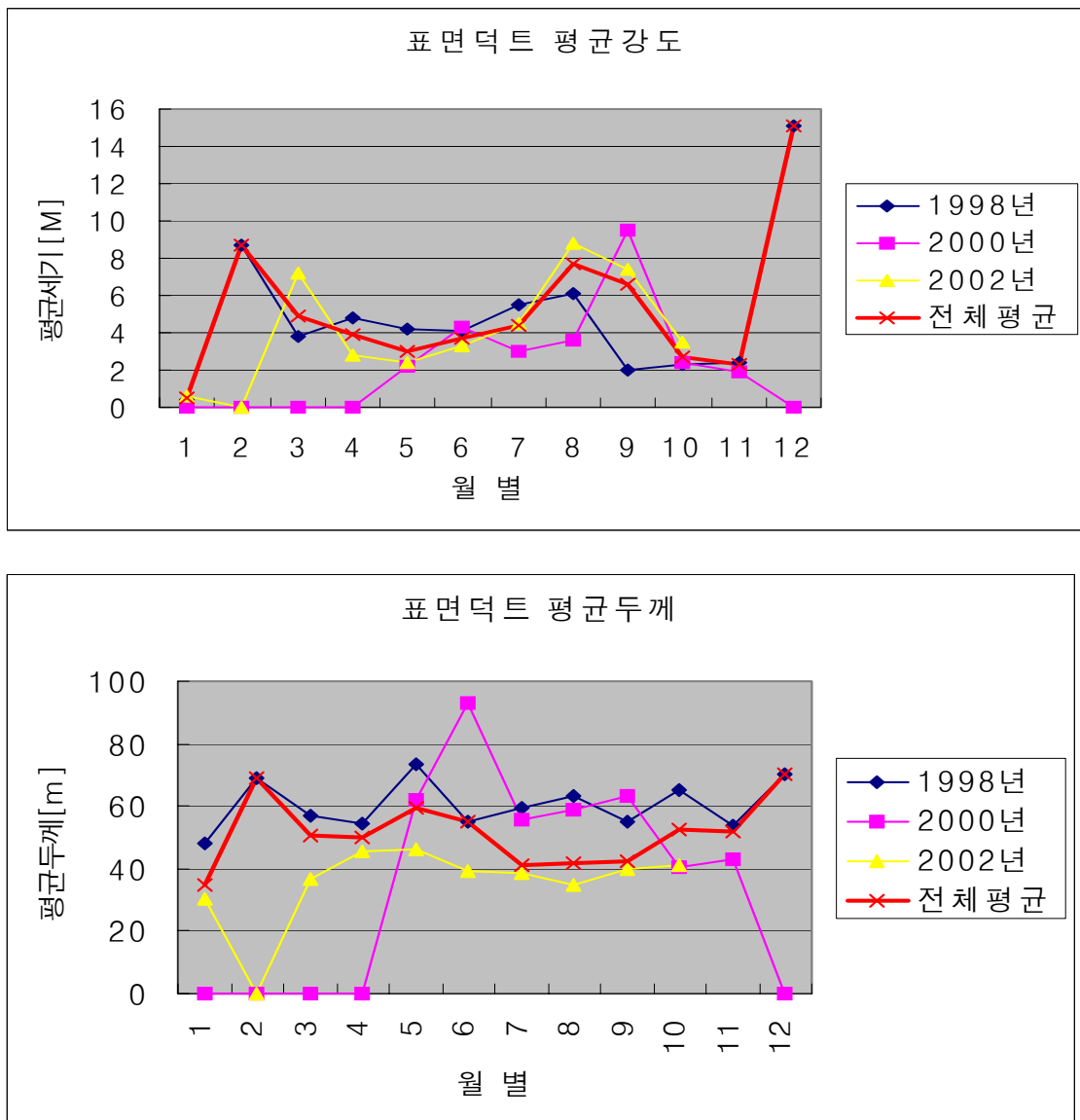


그림5-3 표면덕트 평균 강도 및 두께

다. 상층덕트 강도 및 두께 (Es, Et) 등

포항지역에서의 상층덕트 강도와 두께는 평균 5.02[M], 116.35m로 나타났으며 월별 특성은 그림5-4와 같다.

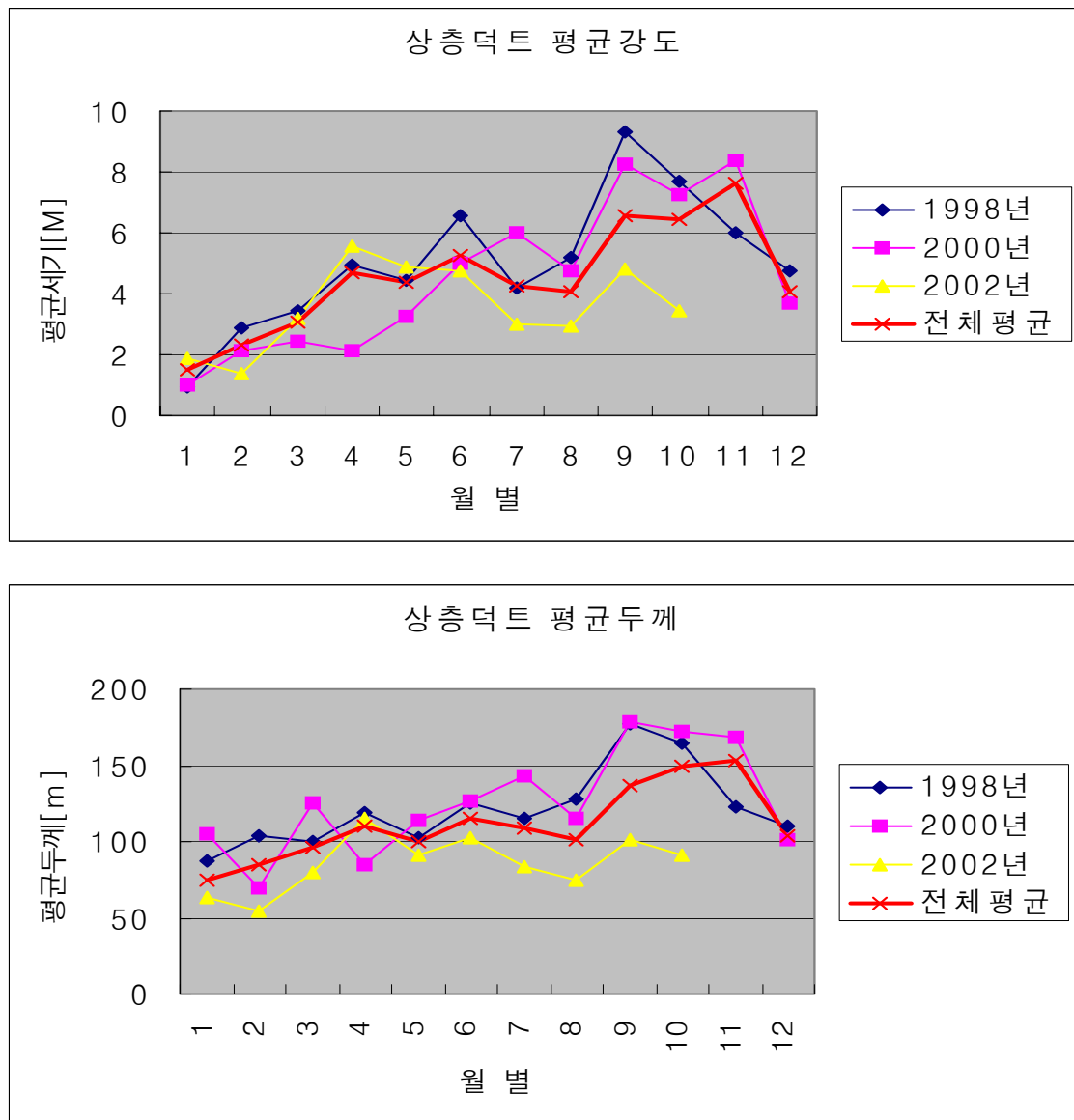


그림5-4 상층덕트 평균 강도 및 두께

라. 상층덕트 발생 높이 (Eb, Em)

Eb와 Em은 상층 덕트에서만 나타나는 인자로서 상층덕트 시작되는 최초 지점과 음의 M 기울기 값이 최초로 나타나는 지점을 알려주는 인자이다.

포항지역에서의 상층덕트 시작지점(Eb)과 M 기울기 값이 최초로 나타나는 지점(Em, 즉 덕트층이 시작되는 높이)은 평균 1009.76m 및 1064.53m로 나타났으며 월별 특성은 그림5-5와 같다.

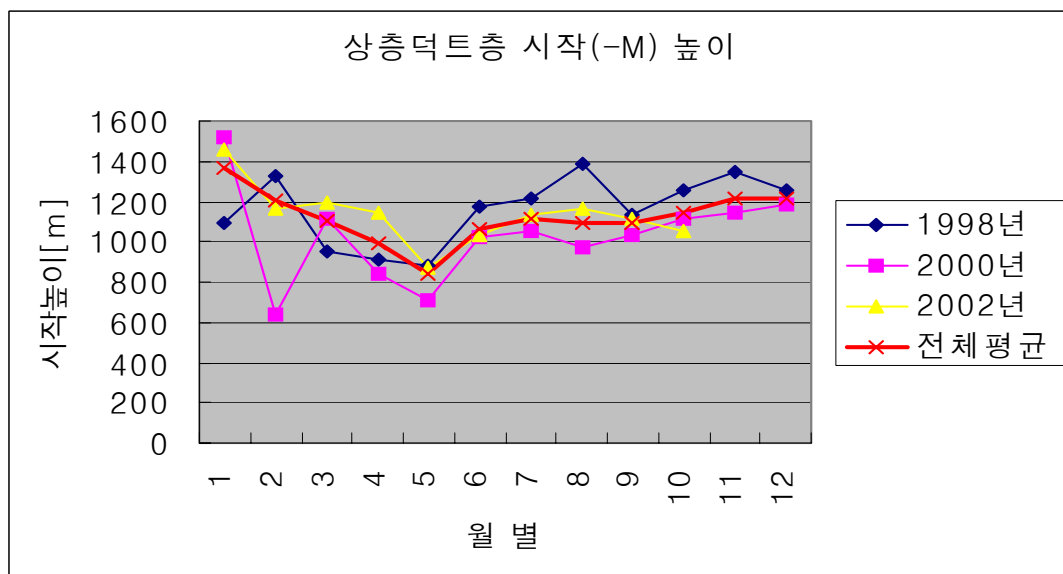
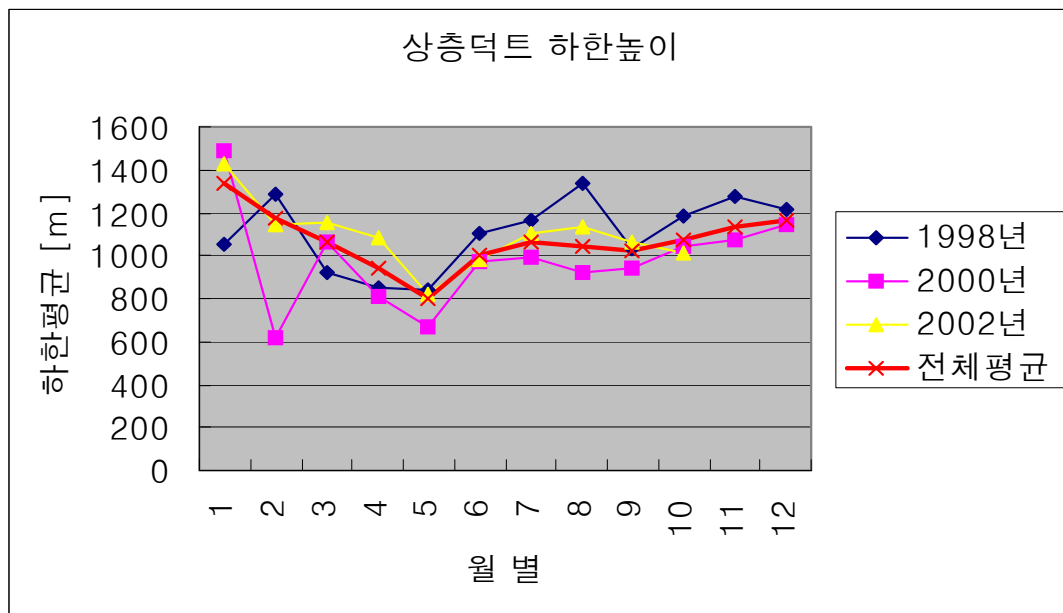


그림5-5 상층덕트 및 덕트층 최초 위치

2. ITU-R 자료와 비교

ITU에서는 661개 세계 주요지점에서 20년 간(1977-1996) 라디오 존데 측정 자료에 기초하여 세계 모든 지점에서의 Ss, St, Es, Et, Eb, Em 평균값을 제공하고 있다. 따라서 여기서는 포항지역(동경 129.22, 북위 36.02)에서의 덕트관련 주요 인자 값을 ITU-R에서 제공하는 자료와 최근 3년간 자료(1998, 2000, 2002년)를 통하여 우리가 직접 분석한 결과와 비교해 보았다.

표5-2 ITU-R 제공자료와 최근 3년 기상 분석자료 비교

비 교 항 목		ITU-R 제 공 자 료	최근 3년 기상분석 자료
표 면 덕 트	년 평균 표면덕트 발생확율	11 %	23.64 %
	표면덕트 평균 강도(Ss)	8.5 M	4.96 M
	표면덕트 평균 두께(St)	65 m	47.73 m
상 층 덕 트	년 평균 상층덕트 발생확율	15 %	36.35 %
	상층덕트 평균 강도(Es)	9.7 M	5.02 M
	상층덕트 평균 두께(Et)	200 m	116.35 m
	상층덕트 하한 높이(Eb)	1200 m	1009.76 m
	덕트층 하한 높이 (Em)	1300 m	1064.53 m

표5-2를 보면 포항지역(동경 129.22, 북위 36.02)을 기준으로 ITU-R에서 제공하는 라디오 덕트 관련 주요 인자값과 최근 3년간 자료(1998, 2000, 2002년)를 직접 분석한 결과와는 상당한 차이를 나타냄을 볼 수 있다. 이와 같이 차이를 보이는 원인을 생각해보면 먼저 우리가 분석에 이용한 자료의 양이 부족하여 실제 기상정보를 제대로 반영하지 못하였거나 혹은 라디오 덕트로써 간주할 수 있는 굴절을 층의 크기(세기나 두께)대한 한계를 정하지 않았기 때문에 발생한 것으로 추측된다. 따라서 앞으로 계속되는 2003년도에는

더 많은 기상자료와 세밀한 분석을 통하여 ITU-R 제공 자료와 비교해 볼 예정이다.

한편, ITU-R에서는 전 세계 지역중 661개 지역에서 20년간 측정한 고층 기상자료를 이용하여 분석한 결과이며 이를 기준으로 세계 전 지역의 굴절율을 추정하여 작성하였다. 이때 661개 지역에서 측정한 20년간 기상자료란 세계기상기구(WMO)의 기상자료 데이터 베이스를 이용했음을 의미한다. 그러나 WMO의 세계 각지역 기상자료 DB란 실제로 우리가 관심이 있는 높이에 대하여 상세한 정보를 제공할 수 있는 자료는 아니다. 즉 우리가 관심 있는 라디오 덕트는 지상에서부터 2 내지는 3km 정도까지의 고도에 대한 상세한 기상 정보이나 실제로 세계기상기구에서는 지상에서부터 30 여 km 에 걸친 기상정보를 대상으로 하고 있어 우리가 관심을 가지는 2내지는 3km 이내 높이에서 제공하는 기상정보는 10여 개가 못된다. 즉 세계 기상기구의 DB를 이용해 지상에서 3km까지의 높이에서 기상정보를 얻을 수 있는 지점은 지표면 및 기압이 1013mb, 1000mb, 925mb, 850mb, 및 700mb인 지점에서의 기상정보에 불과하며 이들 중간에서도 기상이 특이하게 변할 경우 그 특이 지점에 대한 정보일 뿐이다. 따라서 세계기상기구의 DB를 이용하여 분석하는 경우 우리가 얻을 수 있는 고도별 정보는 10여 개가 되지 못해 보다 덜 상세한 자료를 이용하여 세계 각지역의 고도별 굴절율 정보를 제공하고 있다. 따라서 ITU에서는 개별 지역별 고도별 대기굴절율 정보를 가지고 있는 경우는 그 자료를 직접 이용하고 개별 지역의 상세 굴절율 정보를 확보하지 못한 경우 ITU 제공 정보를 이용하도록 권고하고 있다. 반면 우리가 포항기상대에서 수집한 기상정보는 3km까지의 고도에 대하여 100여 개 이상 지점에 기상정보를 제공하고 있어 보다 상세한 대기 굴절율 정보를 얻을 수 있다. 비록 우리가 분석한 자료는 3년 간이라는 짧은 기간의 자료이지만 높이별 상세히 구분된 근거하고 있어 보다 정확한 굴절율 정보일 수 있다. 따라서 앞으로 보다 많은 기간의 기상자료를 이용하여 국내 각 지역의 대기굴절율 정보를 분석한다면 ITU 제공자료 대신 이를 이용할 수 있을 것이다.

3. 고도별 덕트발생 확률

포항기상대의 기상자료에 근거하여 지상에서 1m 단위로 2km까지의 높이에 걸쳐 덕트 발생 확률을 구하였다. 여기서는 음의 M 기울기를 나타내는 모든 지점을 라디오 덕트로 간주하였으며 1m 간격의 각 높이마다 표면 덕트나 상승덕트가 발생할 확률을 구하였다. 포항지역의 3년간 기상자료를 이용하여 국내 포항지역에서의 고도별 덕트발생확률은 그림5-6과 같이 나타난다.

그림을 살펴보면 포항지역에서 가장 덕트 발생 확률이 낮은 위치는 고도 100m±50 높이로서 약 2% 내외의 덕트발생 확률을 나타낸다. 이 높이보다 낮은 위치에서는 그림에서는 표시되어 있지 않으나 실제로 최고 덕트발생 확률이 23.6%에 이른다. 낮은 고도에서 이와 같이 높은 덕트발생 확률을 나타내는 이유는 표면덕트의 일종인 기화덕트(evaporation duct) 영향 때문이다. 기화덕트란 해수면의 기화작용에 의해 형성되는 덕트를 말하며 해수면에서는 거의 항상 존재하는 덕트이다. 즉 바다 위 해수면에서는 해수의 증발작용이 활발히 일어난다. 이로 인하여 해수면에서 수 십m 내외의 고도에 걸쳐 습도의 변화가 급격히 나타나게 되어 이것이 덕트를 형성하게 된다.

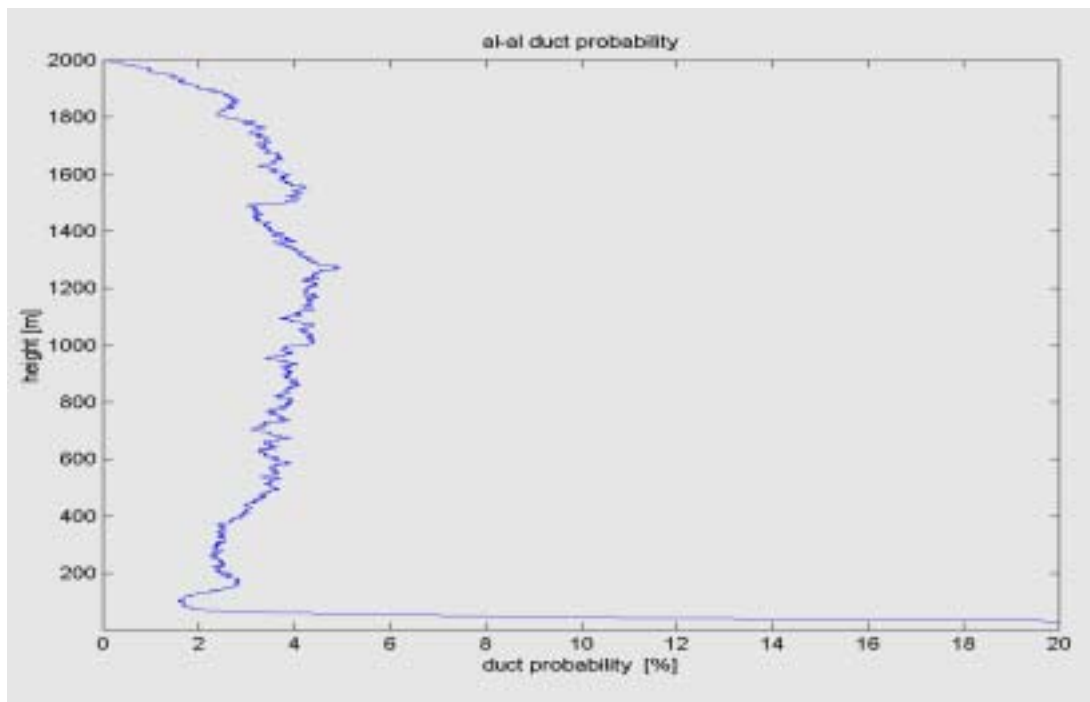


그림5-6 고도별 덕트 발생 확률 (포항지역)

일반적으로 기화덕트의 높이는 북반구에서는 평균 8m, 적도 부근에서는 30m 정도로 알려져 있다. 이러한 기화덕트는 해수면에서는 거의 항상 발생하는 것으로 알려져 있어 표면덕트의 발생확률이 높게 나타나는 요인이 된다. 그러나 기화덕트가 거의 항상 존재하는 덕트임을 감안할 때 우리가 구한 표면덕트 확률 23.6%로 다소 낮게 나타났는데 그 이유는 우리가 분석에 이용한 기상자료는 고도별로 평균 25m(2002년 자료) 혹은 50m(2000, 1998년 자료) 간격으로 측정한 자료이기 때문에 평균 10m 이내에서 형성되는 기화덕트가 기상자료에서 제대로 반영되지 못한 요인으로 보인다.

한편 200m 이상의 고도에서는 2.5~5% 이내의 덕트 발생확률을 나타낸다. 고도에 따른 덕트 발생확률이 특히 높이 나타나는 특정 고도를 기준으로 어떠한 특정 분포를 보이지 않고 높이별로 2.5~5% 사이에서 임의의 값을 가짐을 볼 수 있다.

제 2 절 라디오 덕트에 의한 전파전파 특성 시뮬레이션

일본, 중국의 VHF/UHF 주파수 대역의 전파가 국내 남/동해안이나 서해안지역으로 유입되는 원인을 분석하기 위하여 표준대기, 표면덕트, 상층덕트를 가정한 상태에서 미 해국성에서 공개한 APM(advanced propagation model) 프로그램을 이용하여 라디오 덕트에 의한 전파전파 특성을 시뮬레이션 하였다. 이 시뮬레이션을 위해서 한일, 한중간 전파거리를 250km로 가정하였으며 표준대기, 표면덕트, 상층덕트 조건에서 200MHz, 800MHz 및 2GHz 주파수의 전파가 어떻게 국내 해안지역으로 전파되는 지를 분석하였으며 대기분포의 변화는 고도에 따른 변화만을 고려하였으며 수평방향으로는 동일한 대기분포를 가진다고 가정하였다.

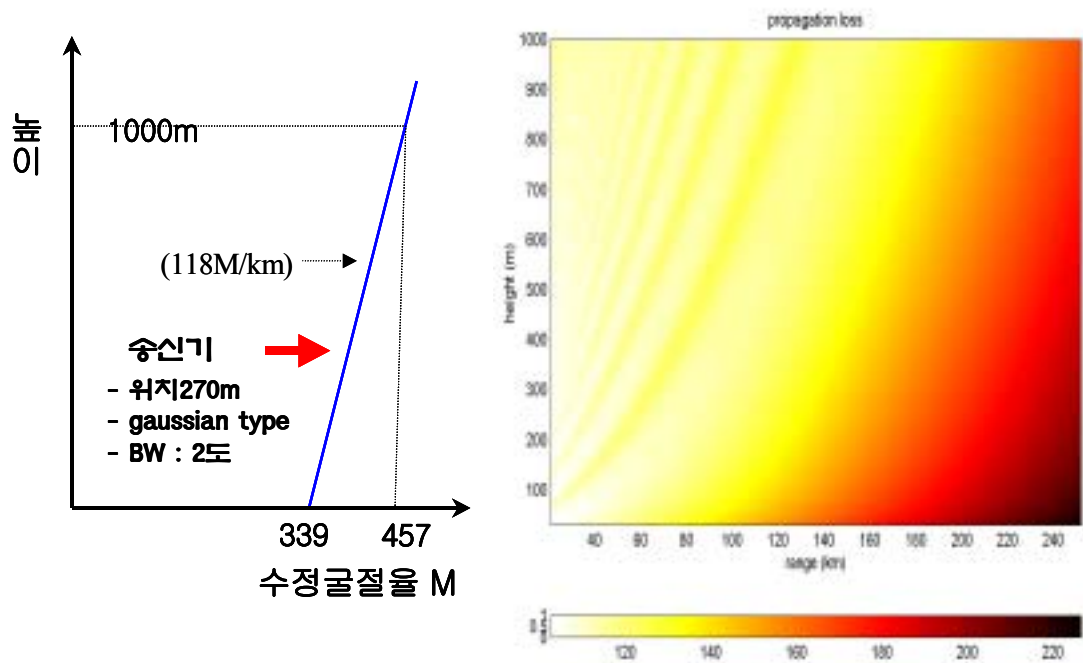
1. 표준 대기에서의 전파전파 특성

그림5-7(a)와 같이 대기굴절율 값이 지표에서 339M, 지상 1000m지점에서 457M로 가정(즉 대기굴절율이 118M/km조건 만족)했을 때 전파전파 특성을 구하였다. 이때 송신기는 거리 0 km, 고도 270m에 위치하는 것으로 가정하였으며 이러한 조건에서 250km까지의 각 지점(거리1km간격, 높이 1m 간격)에서 전파손실(propagation loss) 구하였다. 송신 안테나는 지향성 안테나로 빔폭(beam width) 2도, 가우시안 빔 타입(gaussian type)으로 틸팅(tilting)없이 수평으로 전파가 방출됨을 가정하였다.

이렇게 가정한 경우 200MHz, 800MHz, 2GHz 주파수에서의 전파전파 특성을 전송손실로 구해보면 그림5-7(b)~(d)와 같이 나타난다. 그림5-7을 살펴보면 높은 주파수의 전파가 더 큰 전송손실을 나타냄을 볼 수 있다. 그 원인은 앞에서 본 것처럼 250km지점에서의 자유공간손실(free space loss)이 200MHz 주파수에서는 126.4dB, 800MHz 주파수에서는 138.4dB, 2GHz 주파수에서는 146.4dB로 주파수에 비례하기 때문에 나타나는 결과이다. 자유공간손실은 식2-5와 같이 거리와 주파수의 제곱에 비례하기 때문이다. 일반적으로 자유공간손실이 거리의 제곱에 비례하는 이유는 단위면적당 송신출력은 거리의 제곱에 반비례하기 때문이다. 한편 자유공간손실이 주파수의 제곱에 비례하는 이유는 수신안테나의 유효개구면(effective aperture)이 주파수의 제곱에 반비례함으로써 나타나는 효과이다.

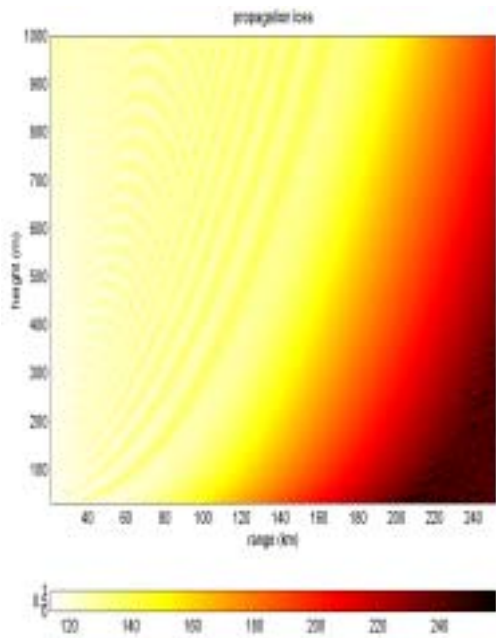
한편, 전파는 수평으로 송신되었는데도 불구하고 전송거리에 따라 위로 휘어지면서 전파하는 것처럼 보인다. 그러나 이는 지구가 곡률을 가진 구면이기에 단지 그렇게 보일 뿐이다.

한편 특정거리 r에서 높이별 전파손실을 살펴보면 높이에 따라 전송손실이 주기적으로 변하면서 높은 위치보다는 낮은 위치에서 전파손실이 더 큰 값을 나타냄을 볼 수 있다. 높이별로 일정한 주기적인 전계강도 세기 변화를 보이는 이유는 직접파와 반사파에 의한 간섭 현상이 발생하기 때문이다. 한편 높은 위치보다는 낮은 위치에서 더 큰 손실을 나타내는 이유는 전체적으로 전파는 평탄대지를 기준으로 위쪽으로 휘어지면서 진행하기 때문에 나타나는 결과이다.

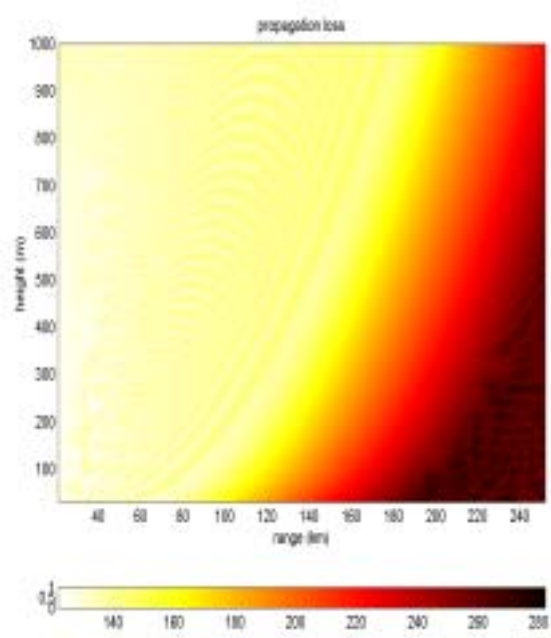


(a) 대기굴절율 및 송신기 위치

(b) 전송손실(200MHz)



(c) 전송손실(800MHz)



(d) 전송손실(2GHz)

그림5-7 표준대기에서의 전파전파특성 비교(200, 800, 2000MHz)

2. 표면덕트에서의 전파전파 특성

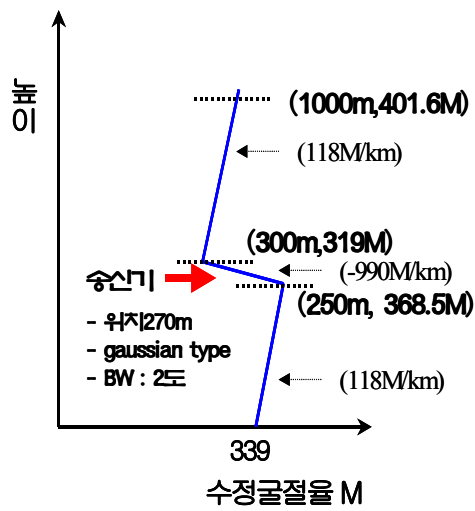
가. 표면덕트 내에 송신기가 위치할 경우

그림5-8 (a)에서는 지상대기를 수정굴절을 M 을 기준으로 표현할 때 250~300m 사이에서 덕트층(ducting layer)가 형성되어 지표면에서 300m 사이에 표면덕트가 발생한 경우를 가정한다. 이때 송신기는 270m 높이에 위치하여 표면덕트 내에 송신기가 위치하는 경우를 가정하였으며 이때 전송손실은 그림5-8(b)~(d)와 같이 나타난다.

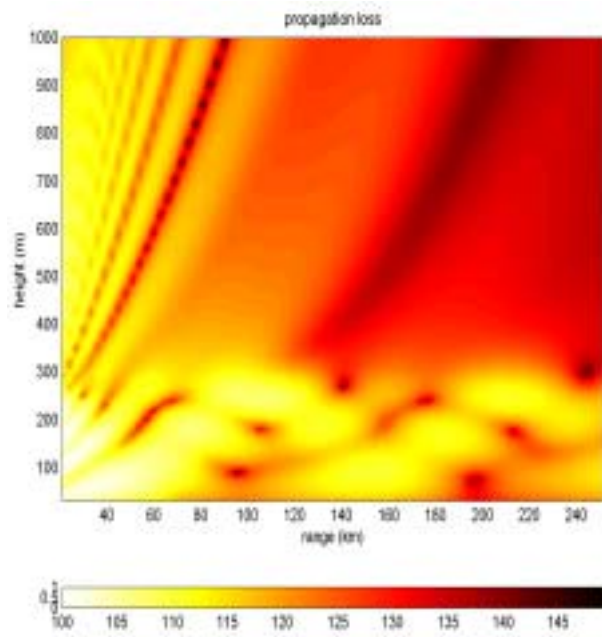
그림에서 보듯이 200, 800MHz 및 2GHz 각 전파의 송신 에너지 상당 부분은 지표에서 300m 사이의 표면덕트 내에 포획(trap)되어 전파됨을 볼 수 있으며 250km 거리의 대부분 지점에서 자유공간손실보다 10dB 이상 강한 세기를 나타낸다. 여기서 고도 300m를 기준으로 전파의 상당부분이 포획되는 이유는 표면덕트가 지표에서 300m 사이에 형성되었기 때문이다.

한편 그림5-8(d)를 자세히 보면 덕트 내에서 전파(propagation)되는 개별적인 전파진행경로를 각각 볼 수 있다. 이는 덕트 내에서 전달될 수 있는 전파란 덕트의 경계조건을 만족하는 특별한 모드의 전파만이 가능한데 이 개별적인 전파진행 경로 각각은 덕트 내에서 전파될 수 있는 각각의 전파모드를 나타낸다.

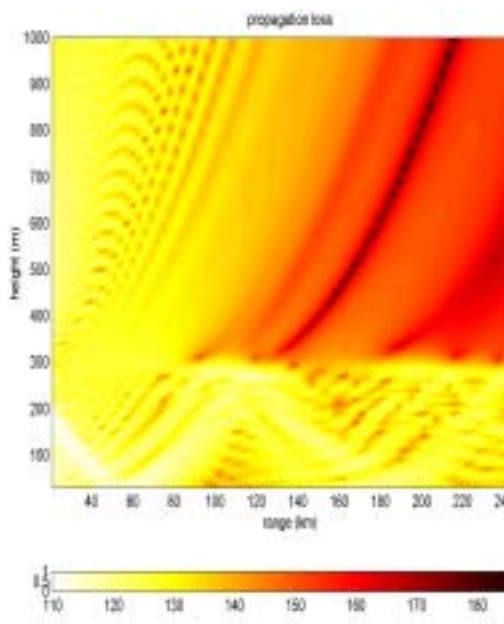
한편, 표면덕트 내에서 전파(propagation)되는 전파 특성은 주파수에 따라 다른 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉 200MHz보다는 800MHz 또는 2GHz 주파수에서 각 전파의 진행경로가 명확히 나타나며 더 많은 전파진행 경로가 존재함을 볼 수 있다. 이는 덕트 형태가 일정할 경우 덕트 내에서 전파될 수 있는 모드 수는 주파수에 비례하기 때문에 나타나는 현상이다. 일반적으로 일정한 덕트 형태가 주어질 경우 이 덕트 내를 전파할 수 있는 전파의 최소 주파수가 존재하며 이를 최소도파주파수(LUF : Lowest Usable Frequency)라 하는데 이는 실제로 덕트의 두께 및 기울기 등 다양한 요인에 의존한다. 따라서 현재 덕트형태에 따른 최소도파주파수를 구하는 방법을 연구 중에 있다. 모드 내를 도파할 수 있는 최소도파주파수가 존재한다는 사실은 주파수가 높아질수록 전파될 수 있는 모드수가 많아짐을 의미하며 그림 5-8(b),(c),(d)의 시뮬레이션 결과는 그러한 사실을 나타낸다.



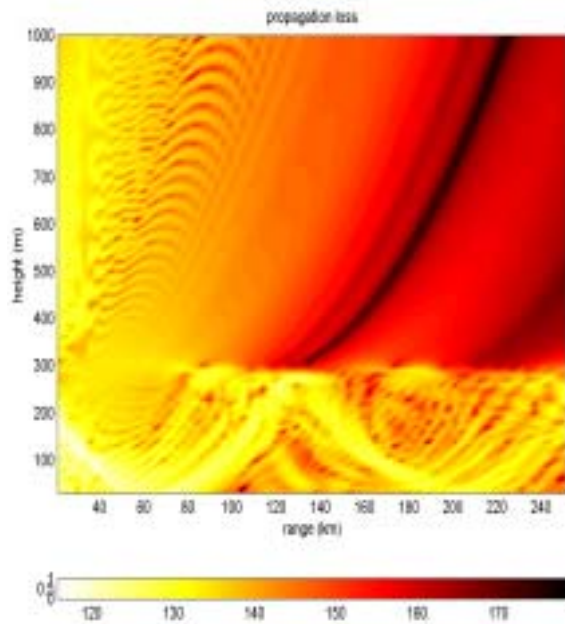
(a) 대기굴절을 및 송신기 위치



(b) 전송손실(200MHz)



(c) 전송손실(800MHz)



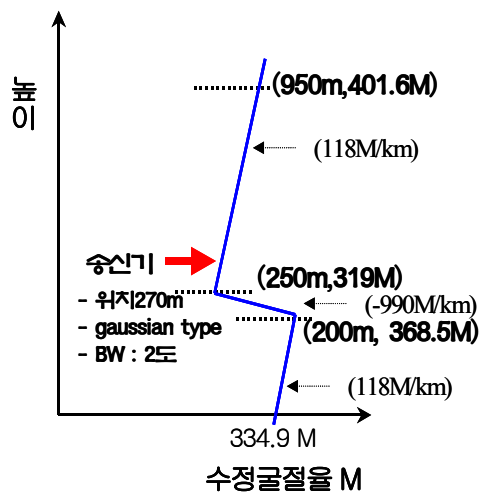
(d) 전송손실(2GHz)

그림5-8 표면덕트에서의 전파전파특성 비교(200, 800, 2,000MHz)

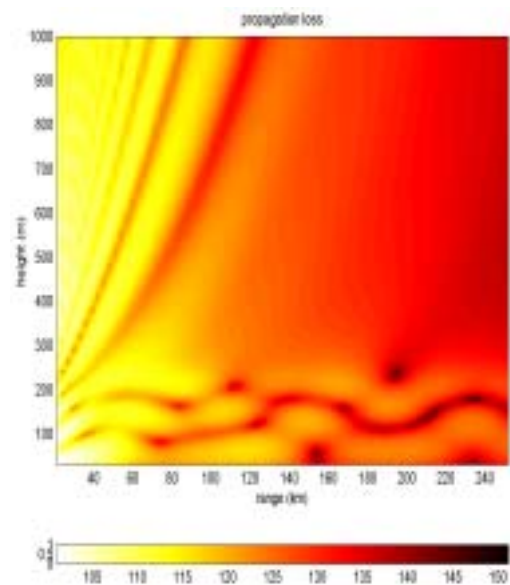
(표면 덕트내 송신기가 위치한 경우)

나. 표면덕트 위에 송신기가 위치한 경우

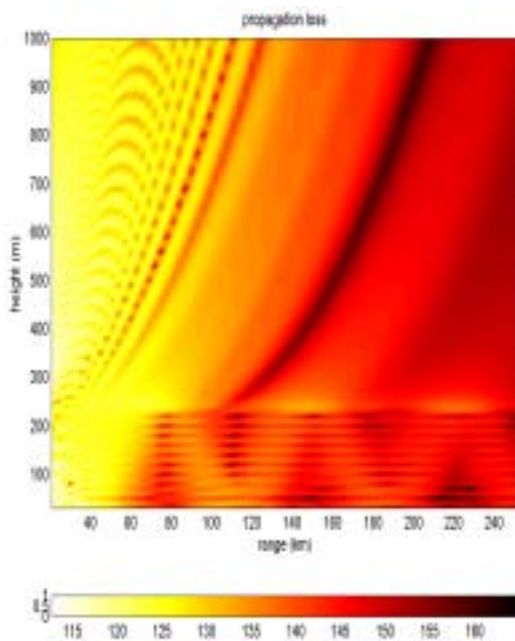
그림 5-9은 표면덕트 위에 송신기가 위치할 경우 전파전파 특성을 나타낸다. 송신기의 위치(270m) 및 종류(가우시안 타입, BW : 2도)는 앞에서 가정한 경우와 동일하며 단지 표면덕트가 지표에서 250m 사이에 위치하는 상황이다. 이때 송신기는 표면덕트 보다 20m 높은 곳에 위치하고 있으며 그 결과 송신전파는 그림 5-8와는 다소 다른 특성을 나타낸다. 즉 덕트층에 의하여 일부의 전파가 0~250m 사이에 포획되어 전파(propagation)되기는 하나 그림 5-8와 비교할 때 그 세기는 훨씬 약함을 볼 수 있다. 이는 송신된 전파 에너지의 50%이상은 덕트층 상층부에서 반사(실제로는 반사가 아니라 지구 곡률 때문에 전파가 위로 휘어져 버리기 때문임)되어 덕트층 내로 입사되질 못하게 되고 덕트층 내로 진입한 전파조차도 많은 부분은 지표에서 반사된 후 덕트층을 벗어나 버리게 된다. 따라서 덕트 내에서 포획되어 전달되는 에너지는 작은 부분에 불과하게 되어 실제로 자유공간을 가정한 경우에 비해 전계강도 세기는 10dB이상 낮은 크기를 나타낸다.



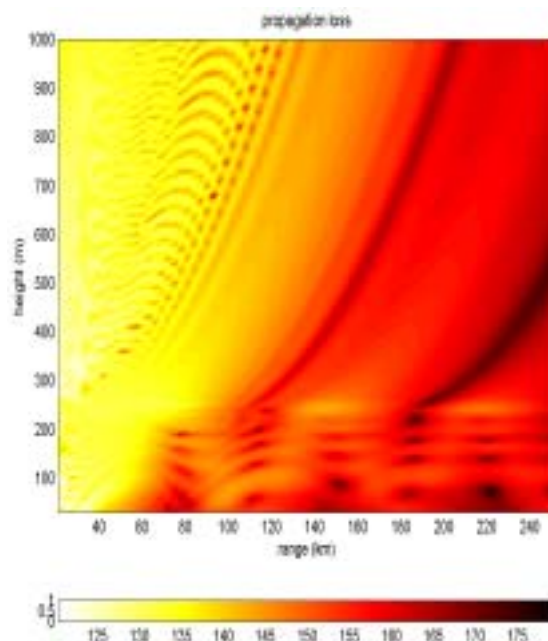
(a) 대기굴절율 및 송신기 위치



(b) 전송손실(200MHz)



(c) 전송손실(800MHz)



(d) 전송손실(2GHz)

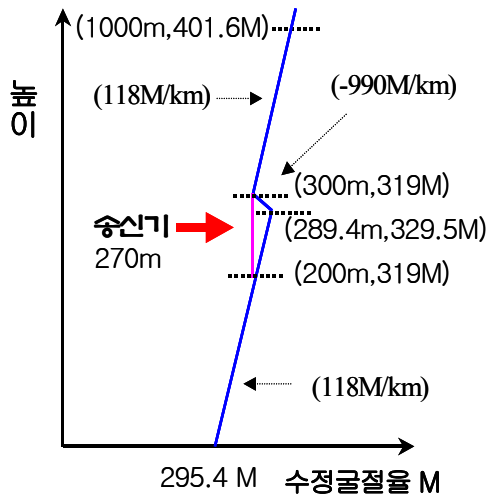
그림5-9 표면덕트에서의 전파전파 특성 비교(200, 800, 2,000MHz)
(표면덕트 위에 송신기가 위치한 경우)

3. 상층덕트에서의 전파전파 특성

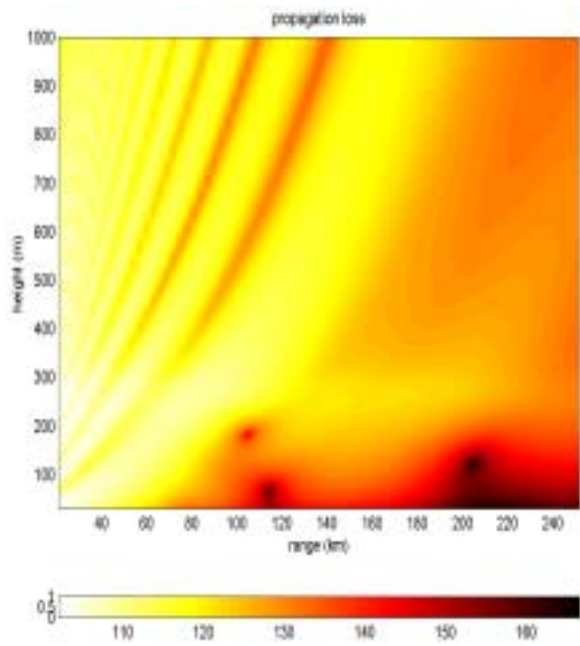
가. 상층덕트 내에 송신기가 위치할 경우

상층덕트 내에서의 전파전파 특성을 보기 위하여 그림5-10 (a)와 같이 대기굴절율을 가정하였다. 덕트층(ducting layer)은 298.4~300m사이(10.6m 두께)에서 -990M/km 기울기로 형성되어 있으며 전체적으로 상층덕트는 지표면에서 200~300m 사이에 위치한다. 이때 송신기는 앞에서 가정한 것과 동일하게 270m 높이에 위치하며 2도의 빔폭을 가지는 가우시안 빔 형태를 가정하였다. 이와 같이 가정한 경우 200, 800, 2GHz 주파수의 전파전파 특성은 그림5-10(b), (c), (d)와 같이 나타난다.

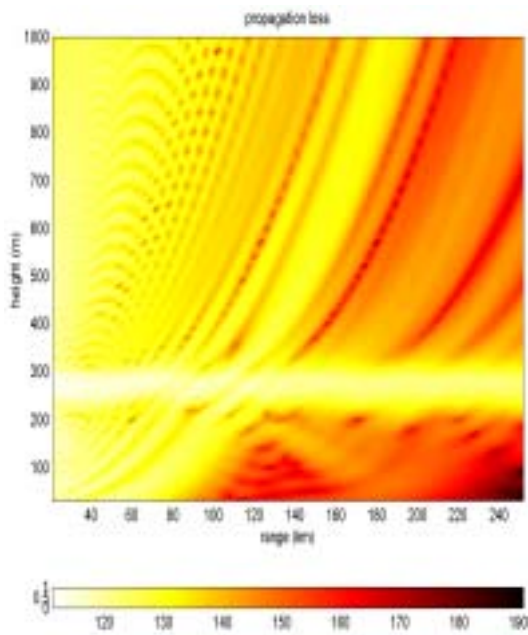
여기서 가정한 상층덕트 두께 100m는 앞에서 가정한 표면덕트에서의 두께 300m(실제로는 470m에 해당함)에 비하면 상당히 작은 양이다. 따라서 이 덕트에 포획(trap)될 수 있는 에너지는 표면덕트일 경우에 비하면 훨씬 작은 양이 된다. 그림 5-10에서 나타나는 특징을 살펴보면 먼저 200MHz 주파수 대역에서는 상층덕트 높이인 200~300m사이에서 전파 세기가 조금 높은 정도를 보일 뿐 에너지가 상층덕트에 포획(trap)되어 전달되는 명확한 상태는 보이지 않고 있다. 반면 800MHz 및 2GHz 전파의 경우 덕트에 포획되어 매우 높은 세기로 먼 거리는 전파됨을 볼 수 있으며 덕트 중심부분에서 전송 손실은 자유공간 손실(800MHz : 138.4dB, 2GHz : 146.4dB)에 비하여 10dB 이상 작음 볼 수 있다. 이와 같이 800MHz 및 2GHz 전파의 경우 상층덕트에 전파가 트랩되어 높은 전계강도로 전파됨을 보이나 200MHz 주파수 전파의 경우 이러한 모습이 명확히 보이지 않는 것은 가정한 상층덕트의 최소도파주파수(LUF : Lowest Usable Frequency)가 200MHz보다 크기 때문에 나타나는 효과이다.



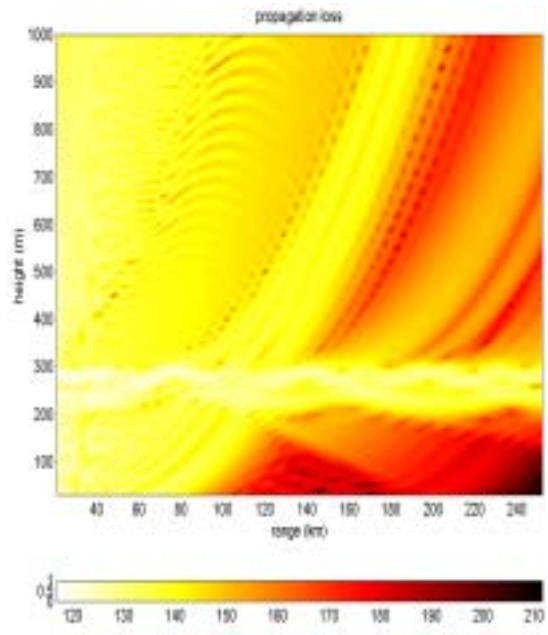
(a) 대기굴절을 및 송신기 위치



(b) 전송손실(200MHz)



(c) 전송손실(800MHz)



(d) 전송손실(2GHz)

그림5-10 상층덕트에서의 전파전파특성 비교 (200, 800, 2,000MHz)

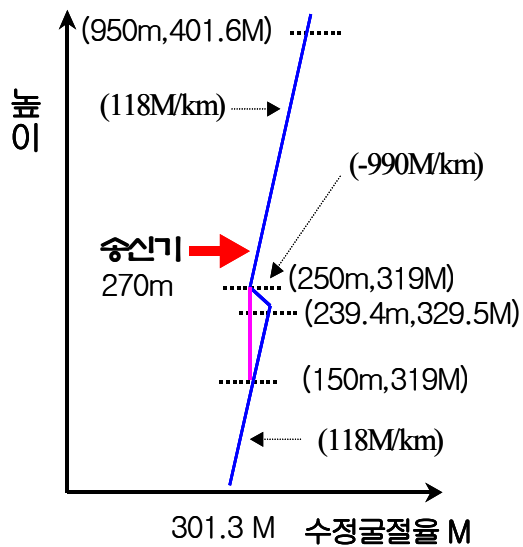
(상층 덕트내 송신기가 위치한 경우)

나. 상층덕트 위에 송신기가 위치한 경우

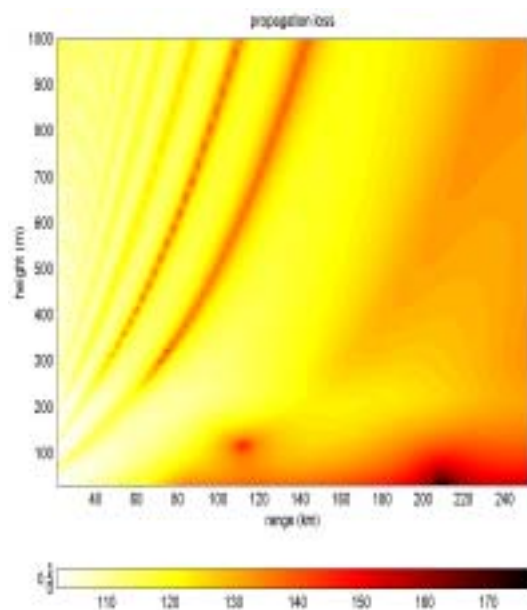
그림5-11 (a)와 같이 송신기와 상층덕트를 가정한 경우 200, 800, 2GHz 주파수의 전파전파 특성은 그림 5-11(b), (c), (d)와 같이 나타난다. 송신기가 상층덕트보다 20m 위쪽에 위치한 경우 전파전파 특성을 살펴보면 송신기가 상층덕트 내에 위치한 경우의 전파전파 특성인 그림5-10와 비교할 덕트 내에서 전송손실이 조금 더 크게 나타날 뿐 전체적으로 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 이는 앞에서 살펴본 표면덕트의 경우와 마찬가지로 송신된 전파 에너지의 50%이상은 덕트층 상층부에서 반사되어 하늘쪽으로 날아가 버리며 덕트층 내로 진입한 전파조차도 일부분은 덕트층 아래로 투과되거나 덕트층 위 부분에서 투과되어 실제 상층덕트 내에서 포획되어 전달되는 에너지는 상대적으로 작아지므로 덕트 내에서 전송손실이 조금 더 크게 나타난다.

다. 상층덕트 아래에 송신기가 위치한 경우

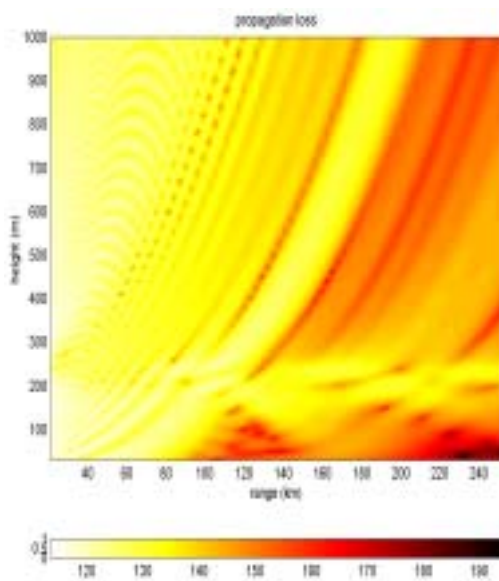
그림5-12 (a)와 같이 송신기와 상층덕트를 가정한 경우 200, 800, 2GHz 주파수의 전파전파 특성은 그림 5-12(b), (c), (d)와 같이 나타난다. 이때의 전파전파 특성은 앞의 그림5-10이나 5-11 경우와는 다소 다르게 나타난다. 즉 그림을 보면 표준대기상태에서의 전파전파 특성과 다소 비슷하나 송신기에서 130m 높이에 상층덕트가 존재하므로 인해 라디오 덕트부분의 아래쪽 부분을 통하여 라디오덕트 부분으로 진입된 전파의 일부만이 다시 아래쪽으로 휘어져 표준 대기의 경우와 비교할 때 전체적으로 덕트층 아래쪽 부분에서도 상당한 세기의 전파가 수신됨을 나타낸다. 그러나 그 세기는 자유공간 전송 세기에 비해서는 훨씬 작다.



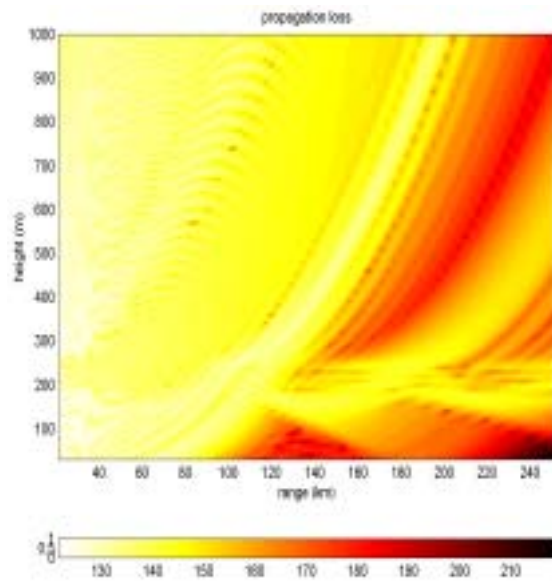
(a) 대기굴절을 및 송신기 위치



(b) 전송손실(200MHz)

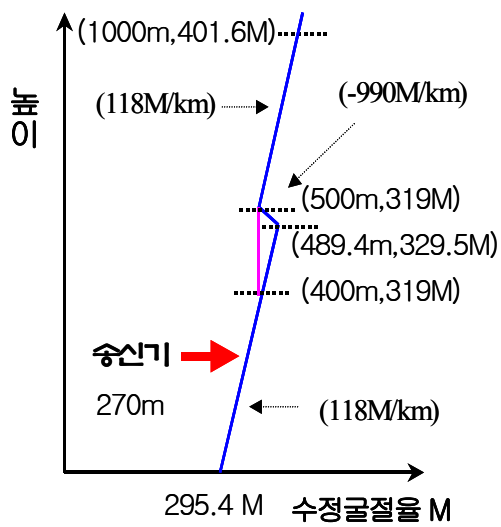


(c) 전송손실(800MHz)

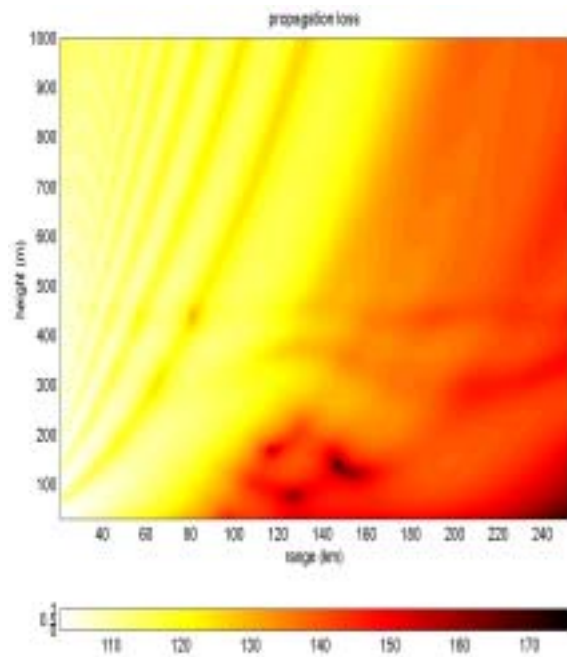


(d) 전송손실(2GHz)

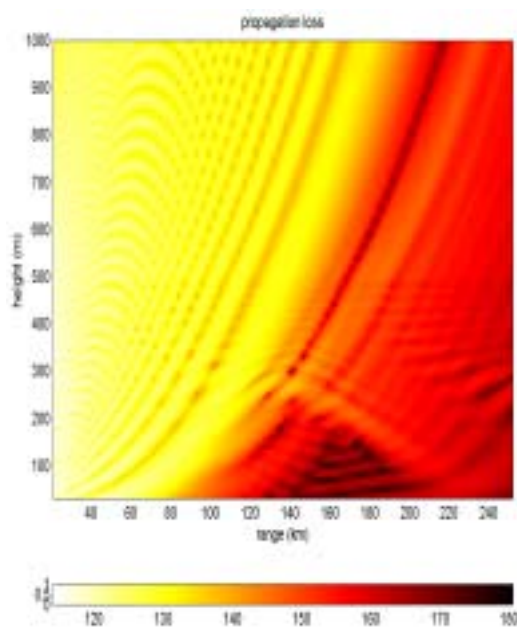
그림5-11 상층덕트에서의 전파전파특성 비교(200, 800, 2,000MHz)
(상층 덕트 위에 송신기가 위치한 경우)



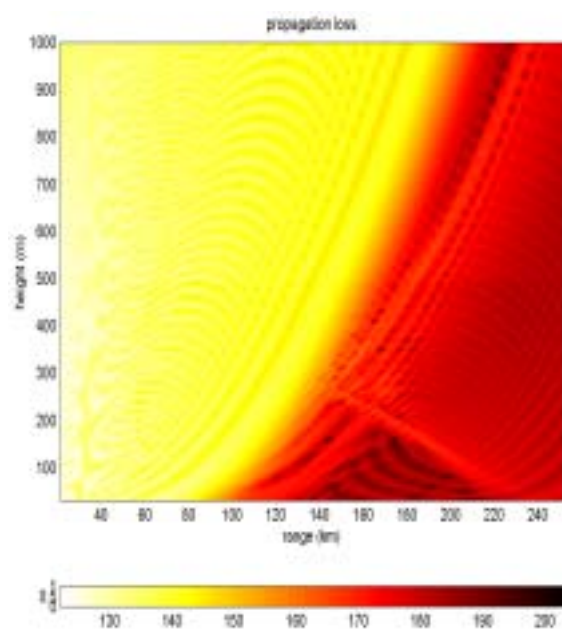
(a) 대기굴절을 및 송신기 위치



(b) 전송손실(200MHz)



(c) 전송손실(800MHz)



(d) 전송손실(2GHz)

그림5-12 상층덕트에서의 전파전파특성 비교(200, 800, 2,000MHz)
(상층 덕트 아래에 송신기가 위치한 경우)

제3절 실제 기상자료와 전파전파 시뮬레이션을 이용한 고도별 외래전파 수신세기 예측

여기서는 포항 기상대에서 측정한 3년간(1967개 측정자료) 대기굴절율 자료와 대기권에서의 전파전파 예측 프로그램을 이용하여 일본전파가 국내 해안지역에 어떻게 영향을 미치는 지를 분석하였다. 즉 일본에서 송신된 전파(여기서는 송신기 높이를 200m로 가정)가 250km 떨어진 우리나라 포항지역에 도달하는 경우 포항 해안지역에서 고도별(1m 간격으로 지상 2km까지) 일본전파 수신세기를 구하였다. 여기서 가정한 송신기 제원은 앞에서 가정한 것과 동일하게 2도의 빔폭을 가지는 가우시안 형태의 지향성 송신기로 가정하였으며 틸팅(tilting)없이 수평으로 전파가 송출됨을 가정하였다. 이 경우 1m 높이마다 1,967개의 수신 전계강도 자료가 주어지므로 이 자료를 통하여 200MHz, 800MHz 및 2GHz 주파수에 대해 고도별로 평균 전계강도 세기 및 1%, 5%, 10% 시간율(time rate) 전계강도 세기를 알아 보았다. 여기서는 전파인자(propagation factor)로서 수신 전계강도 세기를 표시하였다. 전파인자란 자유공간손실에서 실제 전송손실을 빼준 양을 말한다. 즉 실제 공간에서 전파손실이 자유공간 손실보다 클 경우 전파인자(propagation factor)란 음의 값을 나타내며 전파인자가 0이란 실제 전파손실이 자유공간 손실과 동일함을 의미하며 전파인자가 양의 값을 가진다면 실제 전파손실이 자유공간 손실보다 작음을 의미한다. 여기서 전파인자의 단위는 [dB]이다. 전파거리가 250km인 경우 자유공간 손실은 200MHz 주파수에서는 126.4dB, 800MHz 주파수에서는 138.4dB, 2GHz 주파수에서는 146.4dB이다.

1. 고도별 평균 전계강도 세기

그림5-13에서는 1,976개의 개별 기상자료에 대하여 전파전파 시뮬레이션 하였으며 그 결과 고도별 평균 전파인자(propagation factor)를 구하여 "PF"로 표시하였다. 한편 "std-atm"이란 표준대기(standard atmosphere)에서의 전파인자 값으로 고도별 평균 전파인자 "PF"와 비교하기 위하여 함께 그렸으며 그림에서 "std"는 "PF"값이 가지는 표준편차를 말한다.

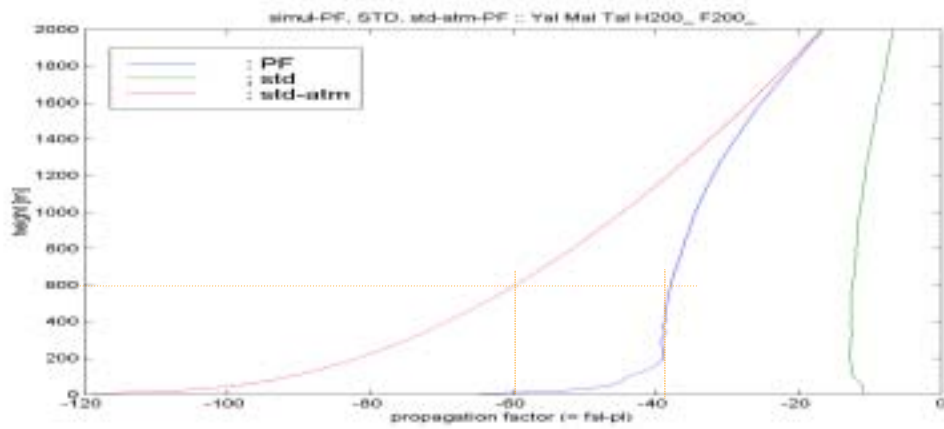
표준대기(standard atmosphere)란 앞장에서 논의한 것처럼 대기굴절율 M

기울기가 118M/km를 가지는 대기상태를 말하며 가장 일반적인 대기굴절율 형태이다. 즉 표준대기란 지구굴절율을 간단히 직선으로 표현할 때 사용하는 지구의 평균 대기굴절율 형태로 볼 수 있으며 일반적으로 송신시스템 설계 시 지구대기권에 의한 전파 굴절효과를 반영할 때 표준대기상태를 가정한다. 이러한 표준대기의 경우 고도별 전파 수신세기를 그림(a), (b), (c)에서 “std-atm”으로 나타내었다.

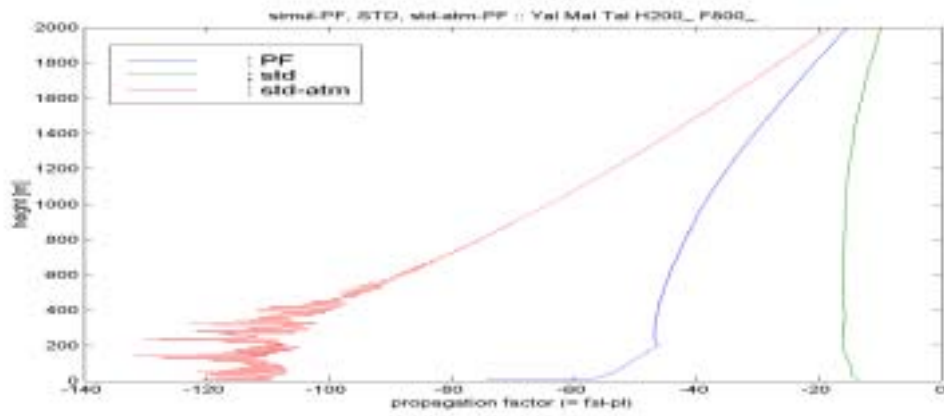
먼저 그림5-13 (a), (b),(c)에서 표준대기에서의 전파특성을 살펴보면 표준 대기에서는 주파수가 높을수록 더 큰 음수의 전파인자 값을 (즉 큰 전파손실)을 나타내며 2GHz에서는 최고 -160dB 전파인자 값을 가지는데 이는 300.4dB 전파손실에 해당하는 큰 손실이다.

한편 실제 대기굴절율 자료를 통하여 전계강도 세기를 평균한 값은 표준 대기에서보다 높은 전계강도보다 세기를 나타내고 있다. 지표면 600m 지점을 기준으로 살펴볼 때 실제대기를 평균한 전계강도값은 표준대기에서보다 200MHz의 경우 약 20dB 이상 크며 800MHz의 경우 약 40dB, 2GHz의 경우 약 60dB 이상 전계강도 세기가 높음을 알 수 있다. 이는 표면덕트나 상층덕트 등 라디오덕트 현상이 실제 대기에서 발생함으로써 전파를 라디오덕트에 의해 높은 전파세기로 먼 거리를 전달 할 수 있기 때문에 발생한다. 한편 주파수가 높아질수록 표준대기에서의 전계강도와 실제 대기상태의 전계강도를 평균한 값의 차이는 더 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 낮은 주파수보다는 높은 주파수 전파가 라디오 덕트 영향을 더 많이 받기 때문에 나타나는 결과이다.

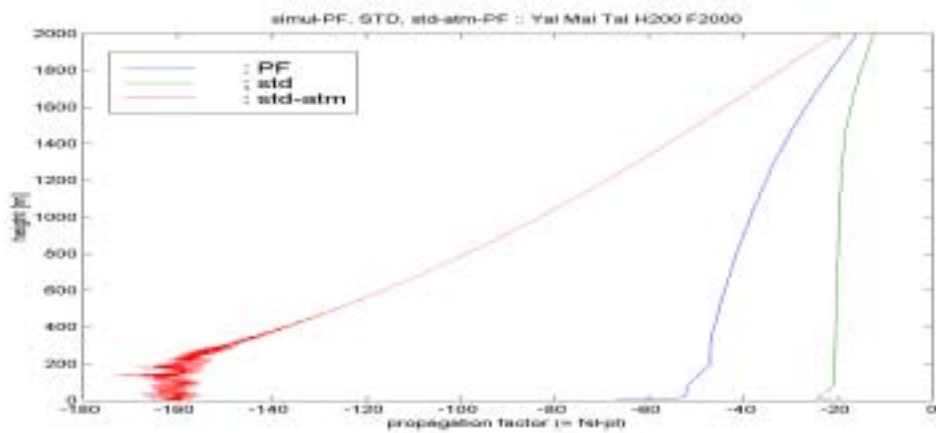
다음은 데이터의 분산 정도를 살펴보자. 100m 이하의 높이에서 각 주파수별 표준편차를 살펴보면 200MHz나 800MHz보다는 2GHz에서 상대적으로 높은 표준편차를 가짐을 볼 수 있다. 즉 그림5-13에서 (a)와 (b)의 경우 고도 100m 이하에서는 평균 전파인자 값은 낮은 값(큰 음수값)을 가지며 동시에 데이터 편차도 상대적으로 작은 반면 그림5-13에서 (c)의 경우 고도 100m 이하에서는 평균 전파인자 값은 낮은 값(큰 음수값)을 가지지만 반대로 데이터 편차는 큰 값을 가진다. 그림5-14~16에서 100m이하의 높이에서 2GHz주파수가 나타내는 시간율 특성이 200MHz, 800MHz와는 다른 이유는 데이터의 분산 특성으로 설명할 수 있다.



(a) 200MHz



(a) 800MHz



(c) 2GHz

그림5-13 고도별 평균 전계강도 및 표준대기에서의 전계강도 비교
PF:평균 전파인자, std:표준편차, std-atm:표준대기에서 전파인자

2. 주파수별 시간율 특성 분석

여기서는 1%, 5%, 10% 시간율 특성 전계강도 레벨로 볼 때 일본전파 영향을 가장 작게 받을 수 있는 국내 수신지역 높이를 알아보고자 한다.

(1) 200MHz 대역 주파수

그림5-14는 200MHz 전파의 시간율 특성을 보여준다. 여기서도 전파손실(propagation loss)대신 전파인자(propagation factor)로 표현하였는데 200MHz 전파의 250km 거리에서 자유공간 손실은 126.4dB이므로 실제 전파손실은 자유공간손실 126.4dB에서 해당 값을 빼주면 된다.

그림에서 가장 큰 음의 전파인자 값을 가지는 지점이 일본전파의 영향을 가장 작게 받는 지점이다. 10% 5% 시간율 특성을 보면 일부 고도(10% 경우 200~250m 높이구간 등)에서 예외적이기는 하나 전체적으로 고도에 따라 전파손실이 작아짐을 알 수 있다. 즉 높은 위치일수록 일본전파가 잘 수신될 수 있음을 말한다. 이는 그림5-1~6에서 보는바와 같이 대기굴절율을 수정굴절율 M으로 표현할 경우 평균 지구의 M 기울기는 118M/km이므로 전파는 전반적으로 위로 휘어지면서 공간을 진행하기 때문에 이러한 결과가 나타난다. 이 결과는 우리 포항지역에서 수신기 위치가 낮으면 낮을수록 10% 및 5% 시간율 전계강도 세기가 낮아짐을 의미한다. 즉 낮게 위치할수록 일본전파의 영향을 덜 받을 수 있는 것이다.

반면 1% 시간율의 경우 100~400m 사이의 고도에서 상대적으로 큰 전파인자 값을 가지는데 이는 이 높이에서 1% 시간율로 볼 때 일본전파의 세기가 매우 높게 수신됨을 의미한다.

참고로 실제 송수신기의 제원을 가정하여 각 시간율별 신호간섭 레벨에 대하여 논의해 보자. 일본송신기의 출력(E.I.R.P.)을 47dBm으로 가정(1999년 한일 양국간 공동실험시 송신기 출력을 47dBm로 설정)하고 국내 수신기가 수신할 수 있는 최소 감도를 -100dBm, 국내 통신망에 간섭을 일으킬 수 있는 전파세기를 -90dBm이상으로 가정하였을 경우 200MHz에서 일본전파가 국내 수신기에서 수신되려면 전파인자 값은 -20.6dB이상이어야 하며, 전파혼신을 야기하기 위해서는 -0.6dB이상의 전파인자 값을 나타내는 경우에

해당한다. 이러한 가정 하에 일본전파가 수신되지 않는 지역의 높이는 10% 시간율의 경우 0~900여m, 5% 시간율의 경우 0~150여m, 그리고 1% 시간율의 경우 겨우 0~10m사이에서만 가능하다. 한편 일본 전파에 의해 국내 수신기가 혼신간섭을 받지 않게 되는 높이는 10% 시간율의 경우 0~1800여m, 5% 시간율의 경우 0~1400여m, 그리고 1% 시간율의 경우 0~50여m 높이에 해당한다.

(2) 800MHz 대역 주파수

그림5-15는 800MHz 전파의 시간율 특성을 보여준다. 800MHz 전파가 250km 거리에서 자유공간 손실은 138.4dB이다.

800MHz 전파의 시간율 특성을 살펴보면 앞에서 본 200MHz전파와 유사하게 10% 및 5% 시간율 특성은 고도에 따라 전파손실이 작게 나타난다. 반면 1% 시간율의 경우 100~400m 사이의 고도에서 상대적으로 큰 전파인자 값을 가지는데 이는 이 높이에서 1% 시간율로 볼 때 일본전파의 세기가 매우 높게 수신됨을 의미하며 200m 높이에서는 약 +7dB의 높은 전파인자 값을 나타낸다.

200MHz에서 가정한 것과 동일하게 송수신기 제원을 가정할 경우 일본전파가 국내 수신기에 의해 수신되려면 전파인자 값은 -8.6dB이상이어야 하며 전파혼신을 야기하기 위해서는 +1.4dB이상의 전파인자 값을 가져야 한다.

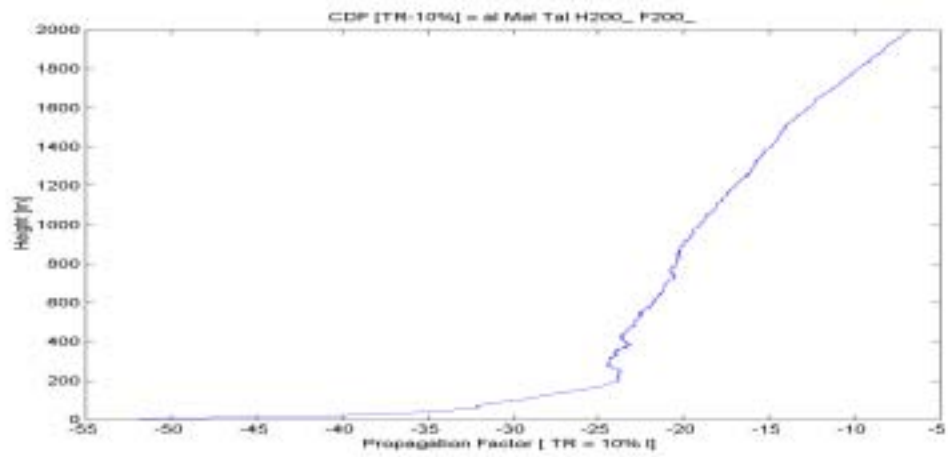
이러한 전파인자 값을 가지는 높이를 알아보면 먼저 일본전파가 수신되지 않는 지역의 높이는 10% 시간율의 경우 0~1700여m, 5% 시간율의 경우 0~1400여m, 그리고 1% 시간율의 경우 0~30여m 높이에 해당한다. 한편 일본 전파에 의해 국내 수신기가 혼신간섭을 받지 않는 높이는 10%나 5% 시간율의 경우 0~2000m이상, 1% 시간율의 경우 140~260m를 제외한 0~1700여m 높이 전체에 해당한다. 즉 1% 시간율로 볼 때 140~260m 사이에 위치한 수신기는 일본전파에 의해 혼신간섭을 받게 된다.

(3) 2GHz 대역 주파수

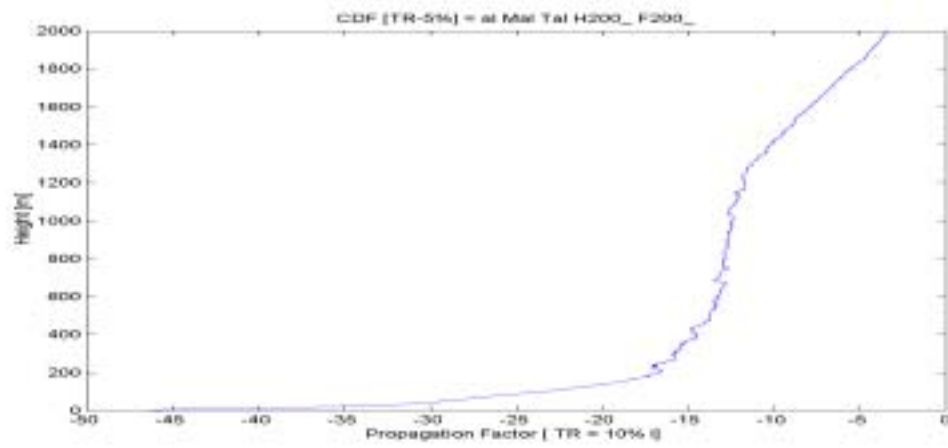
그림5-16는 2GHz 전파의 시간율 특성을 보여준다. 2GHz 전파의 250km

거리에서 자유공간 손실은 146.4dB에 해당한다. 2GHz 전파의 시간율 특성 그래프를 보면 앞의 200MHz나 800MHz 전파와는 다소 다른 특성곡선을 보이는데 특히 지상 100m 이내 높이에서 매우 높은 전계강도 세기를 나타낼 수 있다. 이는 그림5-13에서 본 것처럼 2GHz 전파의 경우 낮은 고도에서 전계강도 세기 분포가 다른 높이에 비하여 넓게 퍼져있어 나타나는 효과이다.

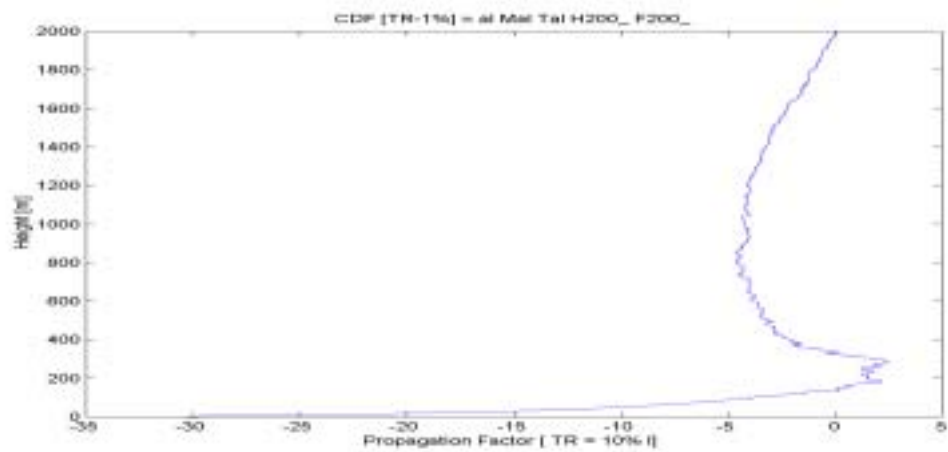
앞에서 가정한 것과 동일하게 송수신기 제원을 가정하여 2GHz 일본전파가 국내 통신망에 영향을 줄 수 있는 전파인자 레벨을 알아보면 일본전파가 국내 수신기에서 수신이 되기 위한 전파인자 레벨은 -0.6dB이상이어야 하며, 전파혼신을 야기하기 위해서는 +9.4dB이상이어야 한다. 이러한 전파인자 값을 가지는 높이를 알아보면 먼저 일본전파가 수신되지 않는 지역의 높이는 5% 및 10% 시간율의 경우 거의 전 높이에 해당하며 1% 시간율의 경우 150~250m를 제외한 0~1600여m 높이에 해당한다. 한편 일본 전파에 의해 국내 수신기가 영향을 받지 않는 높이는 10%나 5% 시간율의 경우 전 높이에 해당하며 1% 시간율의 경우 200±10m를 제외한 전체 높이에 해당한다. 즉 1% 시간율로 볼 때 고도 200m 근처에 수신기가 위치하지만 않는다면 일본 전파에 의한 전파 혼신은 일어나지 않게 된다.



(a) 10% 시간율

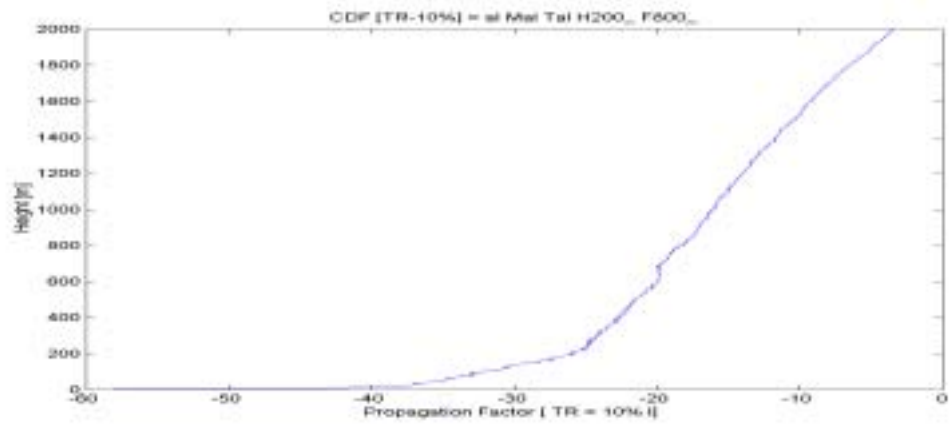


(b) 5% 시간율

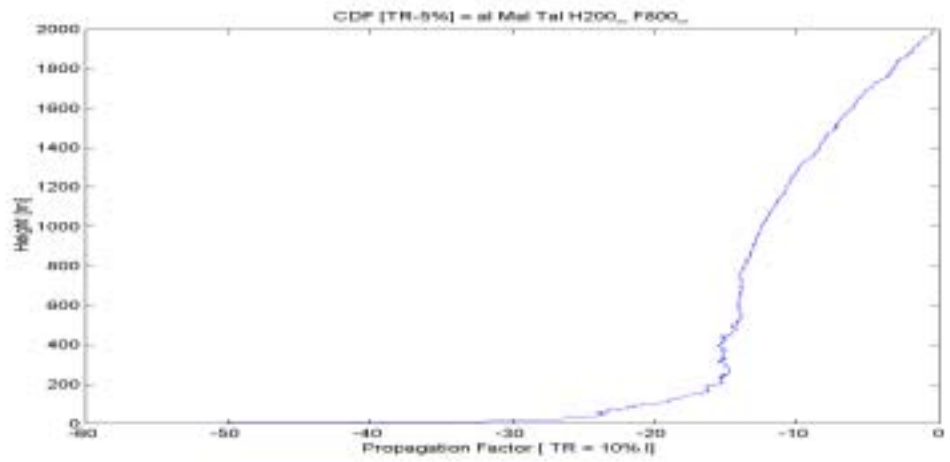


(c) 1% 시간율

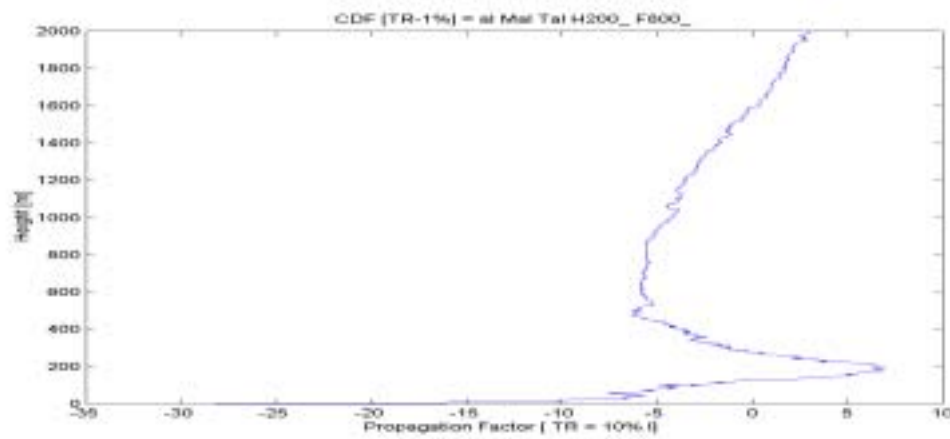
그림5-14 200MHz 전파의 고도별 시간율 특성



(a) 10% 시간율

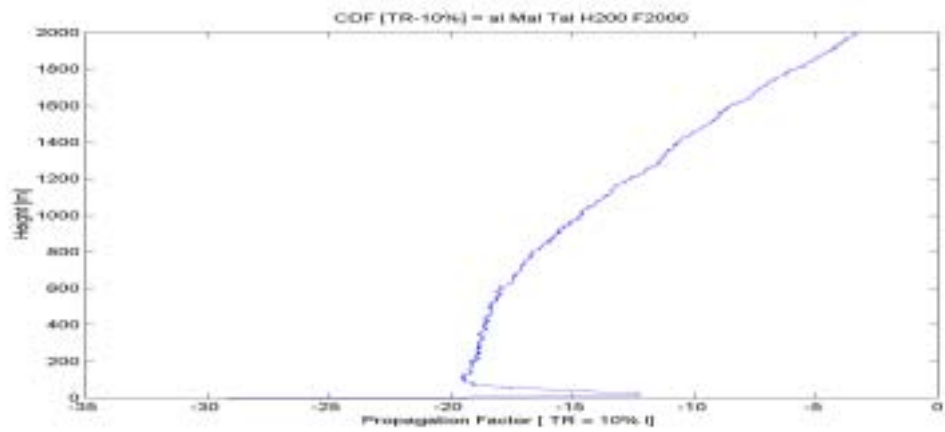


(b) 5% 시간율

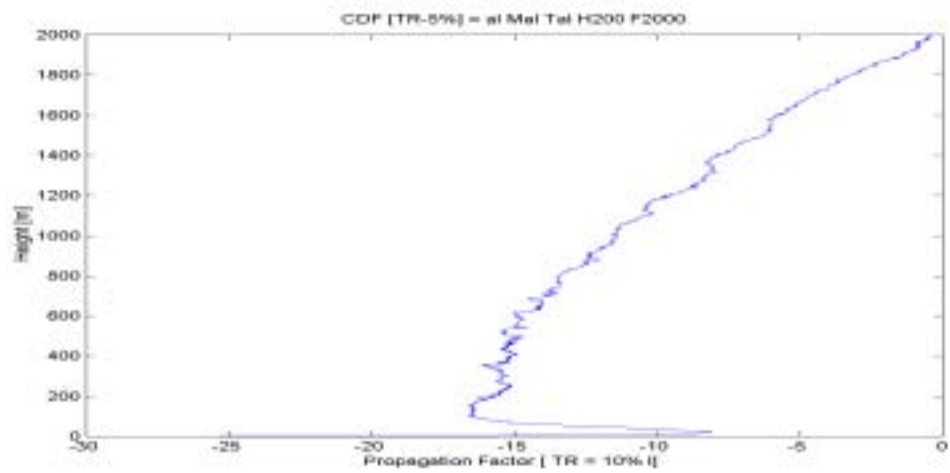


(c) 1% 시간율

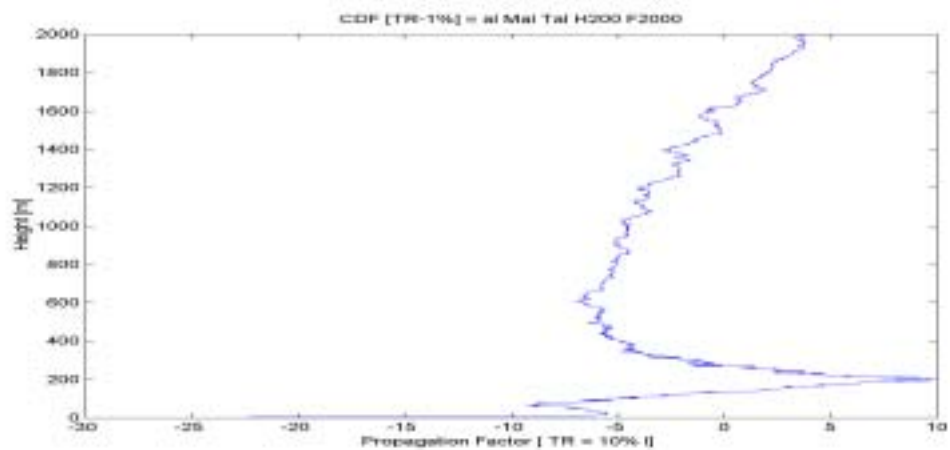
그림5-15 800MHz 전파의 고도별 시간율 특성



(c) 10% 시간율



(c) 5% 시간율



(c) 1% 시간율

그림5-16 2GHz 전파의 고도별 시간율 특성

제 6 장 결 론

인접국 외래전파에 의한 국내 통신망을 보호하고 국내 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위하여 3년 연구과제의 일환으로 2002년 4월부터 본 연구를 수행해 오고 있다.

1차 년도인 2002년에는 국내 해안지역에서의 일본이나 중국의 전파 유입 현황에 대하여 정리하였으며 일본이나 중국의 VHF/UHF 대역 전파가 국내 해안지역에 도달할 수 있는 메카니즘을 조사, 분석하였으며 그 결과 일본이나 중국의 전파가 국내 해안지역 통신망에 영향을 줄 수 있는 메카니즘은 라디오 덕트에 의한 영향이라는 결론을 도출하였다.

우리는 라디오 덕트 원리 및 개념, 종류, 특성 등에 대하여 알아보았으며 실제 라디오덕트에 의한 전파전파 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 일본이나 중국의 VHF/UHF 대역 전파가 국내 해안지역 통신망에 영향을 줄 수 있을 만큼 강하게 전파됨을 확인하였다.

한편 라디오 덕트현상은 대기굴절율로 표현되므로 국내 포항기상대에서 측정한 기상자료를 수집, 분석하였으며 이 분석 자료를 통하여 포항지역에서의 덕트 종류별 발생 확률, 덕트 강도 및 덕트 두께, 덕트가 형성되는 높이 등에 대한 정보를 추출하였다. 이렇게 3년간의 국내 기상자료를 분석하여 얻은 덕트관련 주요 파라메타 값과 ITU-R에서 제공하는 값을 비교해 보았으며 그 결과 둘 사이의 값에서는 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 이렇게 차이나는 원인은 먼저 우리가 직접 분석한 기상자료가 3년자료에 불과하여 추출된 정보의 신뢰성이 부족하여 발생하였거나 혹은 라디오 덕트로서 간주할 수 있는 굴절율 층의 크기(세기나 두께)에 대한 한계를 정하지 않았기 때문인 것으로 추측된다. 한편, ITU-R 제공자료는 고도별 10개 이내의 자료에 근거하기 때문에 실제 기상자료와 상당한 차이를 가질 가능성을 배제할 수는 없다. 따라서 2003년도에는 더 많은 국내 기상자료를 대상으로 라디오 덕트관련 주요 파라메타 값을 추출하여 ITU-R 제공자료와 비교할 예정이다.

한편, 국내 기상자료와 전파전파 프로그램을 이용하여 250km이상 떨어진 일본지역에서 송출된 전파가 국내 해안지역에서 고도에 따라 어떠한 전계강도 세기를 나타내는지를 시뮬레이션 하였으며 개별 고도에서의 통계치를 이

용하여 국내 해안지역중 고도에 따라 일본전파의 영향을 가장 작게 받을 수 있는 수신 높이를 논의하였으며, 이를 200, 800, 2000MHz 전파에 대하여 각각 알아보았다. 그러나 이와 같이 일본전파에 영향을 최소로 받게 되는 국내 수신지역 높이를 도출하기 위해서는 무엇보다도 먼저 충분한 양의 기상자료 확보와 그에 대한 세부적인 분석이 요구된다.

따라서 2003년에는 충분한 기상자료 수집과 분석을 통하여 국내 해안지역의 대기굴절율 정보를 확보할 예정이며 이러한 기상자료를 바탕으로 전파전파 시뮬레이션 프로그램을 통하여 국내 해안 지역에서의 외래전파 수신전파 세기를 예측하고 이를 실제 측정을 통하여 확인해 갈 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] RECOMMENDATION ITU-R P 834-3, "effects of tropospheric refraction on radiowave propagation"
- [2] RECOMMENDATION ITU-R P.452-10, "Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz"
- [3] RECOMMENDATION ITU-R P.453-8, "The radio refractive index: its formula and refractivity data"
- [4] RECOMMENDATION ITU-R P.530-8, "propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems"
- [5] Grant R. Fowles, 'introduction to modern optics', 2nd edition.
- [6] Barry McLarnon, "VHF/UHF/Microwave Radio Propagation: A Primer for Digital Experimenters", ve3jf@tapr.org
- [7] Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego Atmospheric Propagation Branch, "Advanced Refractive Effects Prediction System" 04 April 2002
- [8] S.A. Chahine, H.N. Kheirallah, M. Ayoub, "Study of tropospheric surface refractivity in Lebanon", NSRC, 1999
- [9] G. D. Dockery, "Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 1464 1470, Oct. 1988.
- [10] H. V. Hitney, "Hybrid ray optics and parabolic equation methods for radar propagation modeling", in *Proc. Inst. Elect. Eng. Radar 92 Conf.*, Brighton, U.K., Oct. 1992, pp. 58 61.
- [11] 중앙전파관리소, "2000년도 외래전파조사 종합보고", 2001.1
- [12] 중앙전파관리소, "2001년도 외래전파조사 종합보고", 2002.1
- [13] 한국전자통신연구원, "인접국가간 전파혼신 대책연구", 2001.12
- [14] A. E. Barrios, "A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, pp. 90 98, Jan. 1994.

- [15] G.D. Dockery, "An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solutions of the parabolic wave equation" 1996,
- [16] G.D. Dockery, "Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation", 1998
- [17] Peter Gerstoft, Donald F. Gingras, L. Ted Rogers, and William S. Hodgkiss, "Estimation of Radio Refractivity Structure Using Matched-Field Array Processing", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 48, NO. 3, MARCH 2000
- [18] M.F. Levy, "Parabolic equation modelling of the effects of multipath and ducting on radar systems", 1991