

博士學位論文

지형정보를 이용한 전파 특성 분석



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY  
濟州大學校 大學院

通信工學科

洪 性 旭

1999 年 6 月

# 목 차

목 차 .....	i
표 목 차 .....	iii
그림목차 .....	v
기호설명 .....	ix
Abstract .....	1
I. 서론 .....	3
II. 무선 링크에서의 전파 특성 .....	7
1. 자유공간에서의 전파 .....	7
2. 반사 현상 .....	10
1) 평탄한 대지에서의 반사 .....	10
2) 구면 대지에서의 반사 .....	12
3) 편파 특성에 대한 반사계수 .....	16
3. 매질의 전기적 특성 .....	20
1) 전기적 특성과 주파수에 따른 반사계수 변화 .....	20
2) 반사계수에 대한 원의 방정식 .....	27
4. 회절 현상 .....	34
1) 프레넬 영역 .....	34
2) 단일 장애물 .....	36
3) 다중 장애물 .....	39
(1) Bullington 등가 변환 방법 .....	39
(2) Epstein-Peterson 방법 .....	40
(3) Deygout 방법 .....	40

Ⅲ. 예측모델 및 알고리즘 .....	42
1. 가시거리 예측모델 .....	42
1) 가시거리 예측모델 .....	42
2) 지형 기울기 .....	44
3) 대지면의 환경 특성 .....	51
4) 매질의 전기적 특성 추출 .....	65
2. 회절손실 예측모델 .....	78
1) 회절 손실 .....	78
2) 보정 회절계수 .....	82
3. 알고리즘 .....	84
Ⅳ. 측정 시스템 및 표본 환경 .....	88
1. 송신과 수신 시스템 .....	88
2. 측정 방법 .....	90
1) 이동 측정 .....	90
2) 고정 측정 .....	93
3) 제주대학교내에서의 측정 .....	95
Ⅴ. 결과 및 고찰 .....	97
1. 가시거리 예측모델 .....	97
2. 회절손실 예측모델 .....	105
3. 전계강도 예측모델의 시뮬레이션 .....	111
Ⅵ. 결론 .....	115
참고문헌 .....	117
부록Ⅰ. 제주의 위성사진 .....	122
부록Ⅱ. 알고리즘에 대한 프로그램 .....	123
부록Ⅲ. 제주대학교 지형에 대한 등고선도 .....	128

## 표 목 차

- Table 1. Typical values of ground constants
- Table 2. Calculated values of electrical characteristics for average ground
- Table 3. Specification of measuring system for obtaining electrical characteristics of ground
- Table 4. Average and standard deviation of measured data for stone powder by three frequencies
- Table 5. Average and standard deviation of measured data for asphalt by three frequencies
- Table 6. Average and standard deviation of measured data for turf by three frequencies
- Table 7. Complex dielectric constants for three types of ground
- Table 8. Comparison with field strength by three methods of diffraction
- Table 9. Comparison with field strength at samples B and C
- Table 10. Specifications of transmitter and antenna equipments
- Table 11. Specifications of receive equipments
- Table 12. Measuring routes in western area of Cheju
- Table 13. Measuring routes in eastern area of Cheju
- Table 14. Parameter values of sample points in western area
- Table 15. Parameter values of sample points in eastern area
- Table 16. Parameter values of sample points at Cheju Nat'l Univ.
- Table 17. Modified parameters of sample points by terrain slope
- Table 18. Comparison with field strength for sample points in case of line of sight

Table 19. Comparison with field strength at Cheju Nat'l Univ. in case of line of sight

Table 20. Diffraction coefficients of principal and pseudo obstacles

Table 21. Comparison with field strength for sample points in case of diffraction

Table 22. Diffraction coefficients of principal and pseudo obstacles at Cheju Nat'l Univ.

Table 23. Comparison with field strength at Cheju Nat'l Univ. in case of diffraction



## 그림 목 차

- Fig. 1. Free space path loss
- Fig. 2. Propagation paths over a flat ground
- Fig. 3. Propagation paths over a spherical surface
- Fig. 4. Received field strength versus distance
- Fig. 5. Curve of divergence factor versus distance
- Fig. 6. Reflection of a plane wave on a flat surface
- Fig. 7. Curves of reflection coefficients for average ground  
(a) Magnitude (b) Phase
- Fig. 8. Curves of reflection coefficients  $\rho_h$  for three frequencies  
(a) Magnitude (b) Phase
- Fig. 9. Curves of reflection coefficients  $\rho_h$  for ground constants  
(a) Magnitude (b) Phase
- Fig. 10. Curves of reflection coefficients  $\rho_v$  for three frequencies  
(a) Magnitude (b) Phase
- Fig. 11. Curves of reflection coefficients  $\rho_v$  for ground constants  
(a) Magnitude (b) Phase
- Fig. 12. Radius versus frequency by antenna polarization
- Fig. 13. Circles of reflection coefficients by various frequencies  
( $h_1 = 1.5\text{m}$ ,  $h_2 = 1.5\text{m}$ ,  $D = 25\text{m}$ ,  $\phi = 6.84^\circ$ )  
(a) Vertical polarization (b) Horizontal polarization
- Fig. 14. Circles of reflection coefficients by various frequencies  
( $h_1 = 1.5\text{m}$ ,  $h_2 = 1.5\text{m}$ ,  $D = 20\text{m}$ ,  $\phi = 8.53^\circ$ )  
(a) Vertical polarization (b) Horizontal polarization

- Fig. 15. Fresnel zones at a given point on the propagation path
- Fig. 16. Geometry for propagation over knife-edge  
 (a)  $h$  and  $v$  negative (b)  $h$  and  $v$  positive
- Fig. 17. Diffraction loss over a single knife-edge as a function of the parameter  $v$
- Fig. 18. Bullington's equivalent knife-edge
- Fig. 19. Geometry of Epstein-Peterson's diffraction construction
- Fig. 20. Geometry of Deygout's diffraction construction
- Fig. 21. Propagation paths over a inclined surface
- Fig. 22. Linear interpolation using convex combination  
 (a) One dimension (b) Two dimension
- Fig. 23. Contour line of Cheju
- Fig. 24. Profile and terrain slope of sample A  
 (a) Terrain slope data (b) Distribution of terrain slope (c) Profile
- Fig. 25. Profile and terrain slope of sample B  
 (a) Terrain slope data (b) Distribution of terrain slope (c) Profile
- Fig. 26. Classes of land usage in Cheju
- Fig. 27. Sample points for propagation environments
- Fig. 28. Profile and field strength for sample G1  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile
- Fig. 29. Profile and field strength for sample G2  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile
- Fig. 30. Profile and field strength for sample G3  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile

- Fig. 31. Profile and field strength for sample F1  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile
- Fig. 32. Profile and field strength for sample F2  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile
- Fig. 33. Profile and field strength for sample F3  
 (a) Measured data (b) Comparison with normal distributions  
 (c) Profile
- Fig. 34. Measured data distribution for the case of vertical polarization  
 (a) 1.9GHz (b) 2.2GHz (c) 2.5GHz
- Fig. 35. Measured data distribution for the case of horizontal polarization  
 (a) 1.9GHz (b) 2.2GHz (c) 2.5GHz
- Fig. 36. Circles of reflection coefficients for stone powder  
 (a) Vertical polarization (b) Horizontal polarization
- Fig. 37. Circles of reflection coefficients for asphalt  
 (a) Vertical polarization (b) Horizontal polarization
- Fig. 38. Circles of reflection coefficients for turf  
 (a) Vertical polarization (b) Horizontal polarization
- Fig. 39. Difference between complex Fresnel integral and Lee model
- Fig. 40. Profile of three sample points  
 (a) Sample A: single obstacle ( $h < 0$ )  
 (b) Sample B: multiple obstacles ( $h < 0$  &  $h > 0$ )  
 (c) Sample C: multiple obstacles ( $h > 0$ )
- Fig. 41. Flow chart for the field strength prediction program
- Fig. 42. Diagram of receive equipment system
- Fig. 43. Road map of Cheju
- Fig. 44. Sample points for measuring in Cheju



- Fig. 45. Sample points for measuring at Cheju Nat'1 Univ.
- Fig. 46. Profile and field strength for sample S10  
(a) Measured data (b) Data distribution (c) Profile
- Fig. 47. Profile and field strength for sample D13  
(a) Measured data (b) Data distribution (c) Profile
- Fig. 48. Field strength distribution and predicted value  
(a) Grassland sample S8 (b) Forest sample S4
- Fig. 49. Profile and field strength for sample D1  
(a) Measured data (b) Data distribution (c) Profile
- Fig. 50. Parameter input window
- Fig. 51. Position selection window
- Fig. 52. Calculation result window at a sample point
- Fig. 53. Calculation result window in western area(250m)
- Fig. 54. Calculation result window in western area(25m)
- Fig. 55. Calculation result window in eastern area(25m)

## 기 호 설 명

$\epsilon$	매질의 비유전상수
$\epsilon_c$	매질의 복소 유전상수
$\rho_h$	수평편파에 대한 반사계수
$\rho_v$	수직편파에 대한 반사계수
$\gamma_{h,v}$	편파 특성에 따른 반사계수의 실수 영역 ( $h$ :수평편파, $v$ :수직편파)
$\zeta_{h,v}$	편파 특성에 따른 반사계수의 허수 영역 ( $h$ :수평편파, $v$ :수직편파)
$p_d$	송신 전력에 대한 수신 전력 비율
$r_r$	직접 경로길이와 대지반사 경로길이의 비율
$r_d$	직접 경로길이와 대지반사 경로길이의 차이
$h_{TT}$	가상 평면상의 송신 안테나 높이
$h_{RT}$	가상 평면상의 수신 안테나 높이
$h_{so}$	의사 장애물에 대한 회절 높이
$m_o$	대지면에서 블록한 부분의 수
$v_{so}$	보정 회절계수

## Abstract

It is necessary to analyze the radio wave propagation characteristics and select the parameters which affect the propagation path loss in order to predict a practical service area of radio communication. In the analysis of radio wave propagation, one of the major parameters of interest is propagation path loss. General features and roughness of the terrain contour and the obstacles which are either man-made or natural along the propagation path tend to reduce the field strength reaching receiver, and this also contributes to the overall path loss. The unique properties of terrain can also cause the path losses. These factors should be considered to predict the propagation path loss for a particular radio environment.

In the case of the line-of-sight, the received field strength is changed by the electrical characteristics and environment of a reflected ground and the terrain slope. To obtain the electrical characteristics of the reflected plane, a equation of circle which shows the relationship between complex reflection coefficients and received power is derived. And the data, which are measured for three frequencies with a dipole antenna, are applied to the equation. Then a point of intersection of these three circles indicates the value of a complex reflection coefficient. The environmental characteristics of the ground are divided into the forest and the grassland through applying the natural environment classified according to the satellite photograph of Cheju to the environmental conditions of radio wave propagation. And the reflection

coefficients of these areas are found out by the quantitative analysis and statistical analysis of the measured data. On the other hand, the terrain slopes are obtained through analyzing the profile on the path since the change of the reflected wave was caused by the terrain slope. The prediction model of the line-of-sight is presented by modifying two-ray model with these parameters. In case of the out-of-sight, the field strength is affected by the number and contour of obstacles along transmission path. There are basically three models, such as Bullington's, Epstein and Peterson's, and Deygout's model, that will enable calculation of the excess path loss with results that are approximately equal to a theoretical solution. However these models cannot be used to calculate path loss anywhere, especially in Cheju because there are many hills called 'Orum'. In order to present a model which can be used in Cheju, a correction factor is found out by analyzing the diffraction heights of each obstacle.

In this thesis, the algorithm for the prediction model to predict practical service area of the radio communication is constructed, and a simulation tool is made by this algorithm. The validity of results of this simulation is confirmed by comparing with measured data on all road in Cheju. The prediction model presented in this thesis can provide the more correct service area of the radio communication and help to make a plan of the radio system.

# I. 서 론

무선통신에서 전자파 전파에 영향을 주는 요인에는 환경 요인과 시스템 요인이 있다. 환경 요인에서 언덕과 나무와 같은 자연 지형이나 건물과 같은 인공 구조물은 전파 경로상의 부가적인 손실을 발생시키는 전파 경로상의 장애물이 되거나 다른 서비스 범위로 전자파 전파를 차단하는 차폐물이 될 수 있다. 시스템 요인에서 주파수와 안테나, 그리고 송신 전력 등에 의하여 경우에 따라 음영 지역이 발생하거나 혹은 전자파의 중복 지역이 발생하여 무선국간의 상호간섭 문제를 유발하게 한다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서는 지형적 특성과 장애물의 위치 및 형태 등을 고려한 전파 환경에서 전파 특성 분석과 안테나 및 주파수 특성과 같은 시스템에 의한 전파 특성 분석이 필요하다. 또한 고품질의 이동 통신 서비스와 방송을 위해서는 전자파의 전파 현상에 대한 정확한 이해 및 분석이 반드시 뒷받침되어야 하며 새로운 형태의 무선통신 및 방송은 특히 전자파에 대한 연구와 대책이 필수적이다. 이와 같은 연구를 바탕으로 다양한 환경에서의 정확한 전파 특성 예측이 가능하고 스펙트럼 관리, EMI 기준 등을 선정하는데 크게 기여할 수 있다.

현재 연구되어진 방법들은 환경 특성과 전파 특성에 대한 파라미터를 분석하여 고유의 특징을 갖고 있으며 특정 형태의 구조물 혹은 특정 지형에 적합하다. 그래서 이 방법들을 광범위한 영역에 적용하는 것은 어렵다. 대지면은 평탄하거나 굴곡이 있으며 경사를 이룬다. 이와 같은 전파 환경에서 지형 분포와 대지면의 환경에 대한 정보는 전파 특성 분석에 있어 효율성을 증대시킬 수 있으며, 지형 데이터는 지형 단면도뿐만 아니라 장애물의 수와 위치 그리고 경로 길이를 파악할 수 있고 전파 환경을 구분하는데 유용하게 적용할 수 있다. 대지면의 환경 데

이터는 반사면의 환경을 표현하는데 적합하다.

전계강도의 예측모델 연구에서 일본의 동경 지역을 대상으로 오랫동안 측정된 데이터를 정량화하여 제시한 Okumura(1968) 모델은 오랫동안 이동 통신의 설계 기준으로 사용되었으며 거리, 주파수, 지형 분포, 그리고 안테나 높이 등에 의한 보정 인자를 그래프에 적용하여 구하는 방법이다. Okumura 모델에서 그래프를 사용하는 불편을 해소하기 위해 보정 인자에 의한 예측 방법을 제시한 Hata(1980) 모델은 파라미터 적용 범위를 Okumura 모델보다 작게 구성하였다. Egli(1957) 모델은 주파수에 따라 달라지는 지형의 불규칙성 인자를 고려하여 경로손실을 경험적인 방법으로 제시하였으며 회절손실은 정확히 고려하지 못하였다. JRC(joint radio committee) 모델은 지형 높이를 데이터 베이스화하여 경로 프로파일로부터 전파 환경의 구분과 그에 따른 손실을 구하는 예측 방법을 제시하였다. Longley-Rice 모델은 안테나 높이, 대지상수, 굴절계수, 그리고 기후 등의 전파 환경 및 시스템 파라미터를 적용한 예측 방법이며 고정국간 전송 예측 프로그램을 개발하였다. 여러 나라의 측정 데이터를 수집하여 통계적으로 예측 곡선을 구한 CCIR(consultative committee for international radio, 1978) 모델은 지형 높이의 차를 이용한 예측 방법으로 충분한 정확도를 갖는 보정 인자가 필요하다. TIREM (terrain integrated rough earth model)은 지형 데이터베이스를 이용하여 지형 조건에 따라 12개의 전송모델을 제시하였다 (Parsons, 1992). 무선 링크의 전파 특성에서 반사면의 전기적 특성(도전율, 유전상수)에 관한 연구는 이론 및 실험 반사계수의 특성을 분석하여 다양한 매질의 전기적 특성을 제시하고 있다. 반사계수 특성 분석에서 매질의 전기적 특성은 반사계수를 -1로 두거나 상대 매질에 대한 반사계수로 분석하였으며 전계강도 측정 데이터로부터 반사계수를 구하고 있다. 매질의 전기적 특성에 관한 연구 방법에서 지향 특성이 매우 예리한 안테나를 사용하여 직접파 및 반사파의 전계강도

를 각각 측정하고 이론 및 예측 반사계수를 비교하여 분석하였다(Landron 등, 1993, 1996). 지형 지물과 도로 상태의 특성에 따라 전파 환경을 분류하고 국외의 전파모델들과 비교하여 분석한 연구(이등, 1995, Anderson, 1997) 등이 이루어졌다. 한편 회절 환경에서 다중 장애물에 의한 영향은 각각의 장애물에 대한 감쇠를 합하여 전체 손실을 구하는 Epstein-Perterson(1953) 방법과 전파 경로상의 장애물들에서 회절계수가 가장 큰 장애물을 주된 장애물로 해석하는 Deygout(1966) 방법, 그리고 다중 장애물을 하나의 등가 장애물로 변환하는 Bullington(1977) 방법 등을 이용하여 회절손실을 구하고 있다(Parsons, 1992). 그렇지만 이 방법들은 적용되는 환경에 따라 상당한 오차가 발생하기 때문에 지형 특성에 적합한 해석 방법이 필요하다.

본 논문에서는 전자파 전파 이론과 지형 정보를 이용하여 지형 특성에 적합한 파라미터를 도출한다. 또한 무선통신에서의 수신 전계강도를 예측하기 위해 이들 파라미터를 이용하여 보다 정확한 전자파 전파 특성 예측모델을 제시한다. 연구의 방법은 실제 지형에 적합한 지형 기울기를 제시하기 위해 가상 평면 환경에서의 반사 특성 및 지형 분포를 분석한다. 반사파는 매질의 전기적 특성에 의해 영향을 받기 때문에 이를 정확히 고려하기 위해 매질의 전기적 특성 관계식을 유도한다. 매질의 전기적 특성은 편파 특성에 대한 반사계수로부터 분석할 수 있으며 반파장 다이폴 안테나를 사용하여 편파 특성에 따른 전계강도를 측정한다. 직접파와 반사파를 포함하는 수신 전력식을 이용하여 반사계수의 방정식을 유도한다. 또한 대지면의 환경은 위성사진으로 구분된 자연 환경을 전파 환경 조건에 적용하여 구분하고, 표본 지역에 대한 측정 데이터를 정량적으로 분석하여 대지면의 환경 특성으로 인한 영향을 분석한다. 지형 기울기를 이용하여 직접파·반사파 모델을 변형하고, 환경 특성에 맞는 반사계수를 적용하여 가시거리 예측모델을 제시한다. 또한 회절 환경에서 전파 예측모델에 대한 연구 방법은 이미지 이론과

다중 장애물에 대한 해석 방법을 이용하여 분석하고, 다양한 표본 환경에 대한 측정 데이터를 분석하여 보정 인자를 제시한다. 본 연구에서 제시한 파라미터와 예측모델의 타당성을 입증하기 위해 제주 지역에 대한 예측모델의 알고리즘을 제시하고 측정을 통하여 그 결과를 비교한다.

본 논문의 구성은 2장에서 전자파 전파에 관련된 이론과 매질의 전기적 특성에 따른 반사파 변화, 그리고 직접파·반사파 이론으로부터 전기적 특성의 추출 방법에 대하여 설명하고, 3장에서는 경사가 있는 대지에서의 전파 특성과 파라미터에 의한 변환모델 그리고 측정 데이터를 분석하여 산출한 전기적 특성과 대지면의 환경 특성을 고려한 반사계수를 고찰하여 파라미터를 제시한다. 지형 파라미터와 예측 방법의 적합성을 확인하기 위하여 측정에 사용된 송신 및 수신 시스템과 표본 환경을 4장에서 소개하며, 5장에서는 본 논문에서 제시한 파라미터를 적용하여 구한 예측치와 측정치를 비교하여 고찰한다. 마지막으로 6장에서 본 연구의 결론을 맺는다.





## II. 무선 링크에서의 전파 특성

무선통신에서 전자파 전파는 송신점과 수신점 사이의 전파 경로상에 존재하는 다양한 형태의 구조물에 의해 전자파의 반사, 투과, 회절 및 산란 과정을 거쳐 전파하게 되며 수신 전계강도의 변화를 가져온다. 본 장에서는 전자파의 전파 특성을 분석한다.

### 1. 자유공간에서의 전파

안테나에 의해 발생하는 전자계는 수 파장 이상 되는 거리에서 복사 전자계로 표시할 수 있으며 세기는 거리에 반비례한다. 안테나에 의해 복사되는 전계강도의 방향에 따른 변화 즉 지향성은 안테나의 복사 패턴으로 알려진 공간 각의 함수로 나타낼 수 있다. 안테나의 사용 목적에 따라 모든 방향 또는 특정한 방향으로 복사 에너지를 전파시키기 위해서는 안테나의 방향성이 필요하며 안테나의 지향성은 다음과 같다.

$$D_a = \frac{U}{U_o} \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 최대 복사 방향으로 거리  $D$ 에서 전력밀도이고  $U_o$ 는 거리  $D$ 에서 평균 전력밀도이다. 또한 전력이득  $G$ 는 다음과 같다.

$$G = \frac{4\pi U}{P} \quad (2)$$

여기서  $P$ 는 안테나에 공급된 전력이다. 수신 가능한 전력은 전파를 방사하는 안

테나의 단위면적 당 전력으로 구할 수 있다.

$$P_r = W \times A \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 전력밀도이고  $A$ 는 유효면적이다. 유효면적은 수신 안테나의 수신 유효전력과 도래 전자파의 전력밀도의 비이며 개구를 갖고 있는 안테나에 대해서는 전자파 에너지를 유효하게 흡수하는 면적에 상당하며 다음과 같다.

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \quad (4)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장이다. 송신 안테나와 수신 안테나가 자유공간에 위치하고, 송신 안테나의 이득이  $G_t$ 일 때 송신 안테나로부터 거리  $D$ 에서 전력밀도는 다음과 같다.

$$W = \frac{P_t G_t}{4\pi D^2} \quad (5)$$

유효면적이  $A$ 인 수신 안테나에서의 유효전력은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi D^2} \cdot A = \frac{P_t G_t}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (6)$$

$G_r$ 는 수신 안테나 이득이다. 따라서 송신 전력과 수신 전력의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left[ \frac{\lambda}{4\pi D} \right]^2 \quad (7)$$

이 방정식을 자유공간에서의 기본적 관계식 또는 Friis 방정식이라 한다. Fig. 1은 송신 전력이 1mW이고 송신 안테나와 수신 안테나의 이득이 0dB일 때 주파수 324.75MHz, 893.37MHz, 1843.75MHz에 대한 자유공간 경로손실의 변

화를 나타낸 것이다. 자유공간 경로손실은 대수거리에 따라 일정하게 감소하고 있다. 또한 주파수 324.75MHz에 대한 상대 주파수의 경로손실은 송신 안테나로부터 동일한 거리에서 각각 8.8dB와 15dB의 차이가 있으며, 주파수가 높을수록 경로손실은 크다. 이는 파장의 제곱에 비례하기 때문이다.

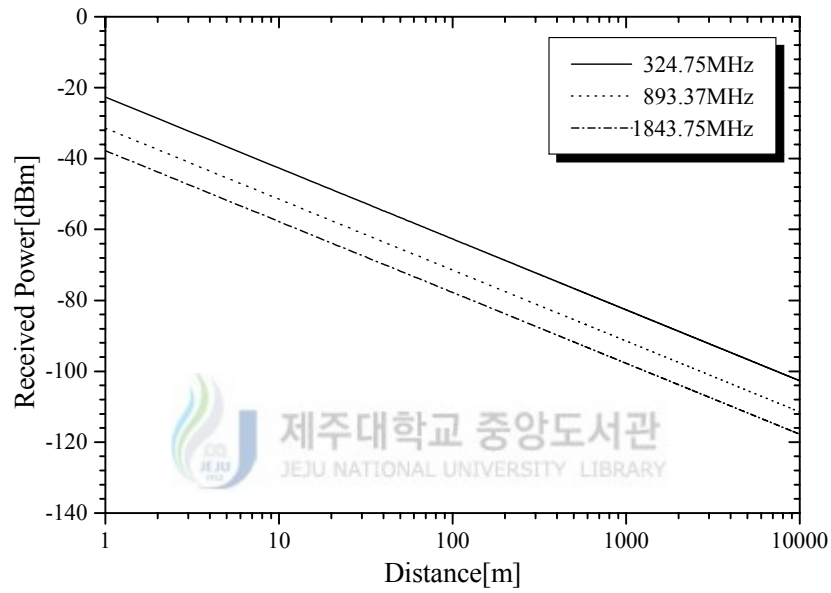


Fig. 1. Free space path loss

전계의 세기와 전력밀도의 관계는 다음과 같다.

$$W = \frac{E_o^2}{\eta} \quad (8)$$

여기서  $\eta$ 는 자유공간에서의 특성 임피던스로서  $120\pi(377\Omega)$ 이다. 송신 안테나로부터 거리  $D$ 에서 자유공간 전계강도는 식(5)와 식(8)의 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_o = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{D} \quad (9)$$

## 2. 반사 현상

실제 환경에서 전파 경로를 방해하는 장애물은 전파 경로상에서 다양하게 존재하기 때문에 자유공간 전파 방정식은 매우 제한적인 조건하에서 적용할 수 있다. 대지 반사현상은 장애물이 없는 환경에서 대지 형태에 따라 해석하여야 한다. 일반적으로 대지면은 송신점과 수신점 사이의 거리에 따라 평탄하거나 구면인 형태로 해석한다.

### 1) 평탄한 대지에서의 반사

반사 표면이 평탄한 전파 환경에서 수신 전계강도는 직접파와 대지 반사파의 벡터 합으로 구할 수 있다. 직접파는 자유공간 전송손실을 이용하여 구할 수 있으며 반사파는 대지의 전기적 특성과 지형 형태를 고려하여 구할 수 있다 (Shibuya, 1987).

가시거리 전파 환경에서 전파 경로는 직접파에 의한 직접 경로와 대지 반사파에 의한 간접 경로로 구분되므로 수신 전계강도는 다음과 같이 직접파와 반사파 전계 성분의 벡터 합이다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_d + \mathbf{E}_r \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{E}_d$ 와  $\mathbf{E}_r$ 은 각각 직접파와 반사파를 나타내는 전계 벡터이다.  $\mathbf{E}_d$ 를 기준 벡터로 두면 수신 전계의 크기는 다음과 같다.

$$E = E_d + E_r e^{-j\theta_r} \quad (11)$$

여기서 직접파와 반사파의 크기는 각각  $E_d$ 와  $E_r$ 이고  $\theta_r$ 는 직접파와 반사파의 위상차이다. 그러므로 수신 전계강도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \sqrt{E_d^2 + E_r^2 - 2E_d E_r \cos(\theta_r - \pi)} \quad (12)$$

평탄한 대지에서 수신 전계강도는 식(12)에서 직접파 성분을 자유공간 전계강도 ( $E_o$ )로 바꾸고 반사계수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$E = E_o \sqrt{1 + \rho^2 - 2\rho \cos(\delta + \phi_\rho - \pi)} \quad (13)$$

여기서  $\rho$ 는 반사계수의 크기이며 반사파의 전체 위상지연 각도는 반사계수의 위상 ( $\phi_\rho$ )과 경로길이 차에 의한 지연 각도 ( $\delta$ )의 합이다.

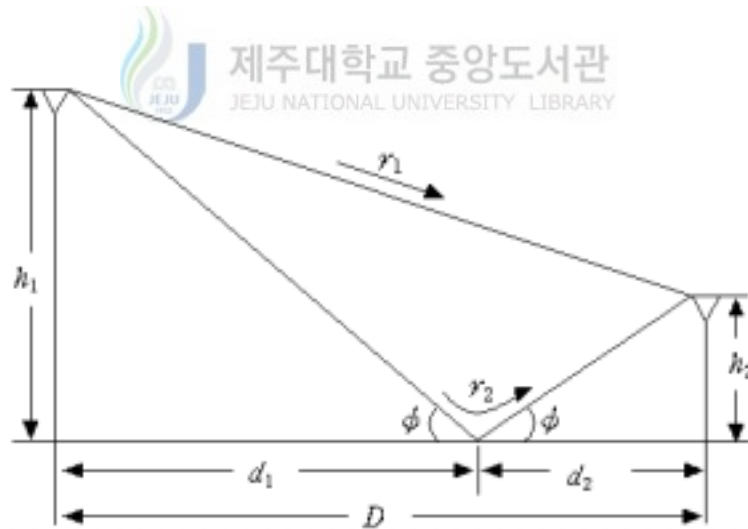


Fig. 2. Propagation paths over a flat ground

Fig. 2는 임의의 높이를 갖는 송신 안테나와 수신 안테나가 평탄한 대지에 놓여 있을 때 입사각 ( $\phi$ )을 갖는 반사 현상을 도시한 것이다. 이 환경에서 직접파와 대지 반사파의 경로길이의 차 ( $\Delta$ )는 이항급수 정리에서 2차 항까지 고려하면 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$\Delta \cong \frac{2h_1h_2}{D} \quad (14)$$

여기서  $h_1$ 과  $h_2$ 는 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 높이이다. 그러므로 경로 길이 차에 의해 발생하는 지연각은 다음 관계로부터 구해진다.

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda D} \quad (15)$$

반사파의 크기와 위상은 굴곡이 없고 유한한 도전율을 갖는 대지에 대하여 이론적으로 구해질 수 있다. 반사파는 대지면이 고르지 못한 경우 산란 현상을 일으키며 평탄한 대지에 비하여 반사파의 세기는 약하게 된다.

## 2) 구(球)면 대지에서의 반사

구면 대지에서의 반사 현상은 구면 발산인자와 평탄한 대지에서의 반사계수로 분석할 수 있다. Fig. 3은 구면 대지에서의 반사 현상을 나타낸 것이다. 송신점과 수신점에서 반사점까지의 거리  $d_1$ 과  $d_2$ 는 비례 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_{1,2} = \frac{h_{1,2} D}{h_1 + h_2} \quad (16)$$

여기서  $h_1$ 과  $h_2$ 는 각각 송신 안테나와 수신 안테나의 높이이고  $D$ 는 송신 안테나에서 수신 안테나까지의 거리이다.

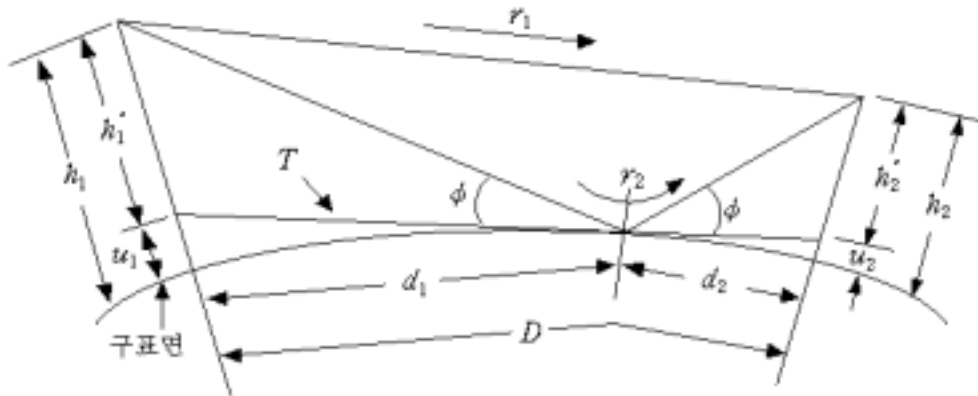


Fig. 3. Propagation paths over a spherical surface

송신점에서 반사점까지의 거리인  $d_1$ 과 반사점에서 수신점까지의 거리인  $d_2$ 를 반사점의 접선 평면상에서 안테나 높이인  $u_1$ 과  $u_2$ 에 대하여 표현하면 다음과 같다.

$$d_{1,2} = \sqrt{2Ka u_{1,2}} \quad (17)$$

여기서  $K$ 는 등가 지구 반경계수이고  $a$ 는 실제 지구 반경이다. 접선 평면상의 등가 송신 안테나와 수신 안테나의 높이는 각각 다음과 같다.

$$h'_{1,2} = h_{1,2} - \frac{d_{1,2}^2}{2Ka} \quad (18)$$

지구 표면은 곡률을 갖는 구면이기 때문에 실제 반사량은 다음과 같은 에너지 발산인자(Griffiths, 1987)를 평탄한 대지에서의 반사계수에 곱하여야 구할 수 있다.

$$D_v \approx \left[ 1 + \frac{2d_1 d_2}{Ka D \tan \phi} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

여기서  $\phi$ 는 접선 평면에 대한 입사여각이다. 따라서 구면 대지에서의 실효 반사계수는 다음과 같다.

$$\rho_e = \rho D_v \quad (20)$$

여기서  $\rho$ 는 평탄한 대지에서의 반사계수 크기이다. 구면 대지모델에서 직접경로 ( $r_1$ )와 반사경로 ( $r_2$ ) 길이의 차는 다음과 같다.

$$\Delta_e = \frac{2h_1' h_2'}{D} \quad (21)$$

이것으로부터 경로길이 차에 의하여 발생하는 지연각 ( $\delta_e$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_e = \frac{2\pi\Delta_e}{\lambda} = \frac{4\pi h_1' h_2'}{\lambda D} \quad (22)$$

구면 대지에서 직접파와 대지 반사파에 의한 수신 전계강도는 다음과 같다.

$$E_e = E_o \sqrt{1 + \rho_e^2 - 2\rho_e \cos(\delta_e + \phi_\rho - \pi)} \quad (23)$$

Fig. 4는 평탄한 대지와 구면 대지에서의 전계강도 변화를 나타낸 것이다. 식 (13)과 식(23)의 수신 전계강도 모델에서 송신 전력은 10W이고 주파수는 324.75MHz이며, 송신과 수신 안테나 높이는 각각 700m와 10m일 때 수신 전계강도이다. 송신 안테나로부터 거리가 10Km 이내일 때 평탄한 대지와 구면 대지에서의 수신 전계강도는 반사계수에 의한 전계강도 변동까지 동일하였고 40Km 지점에서 전계강도는 0.1dB의 차이가 있다. Fig. 5는 Fig. 4에 나타낸 전계강도를 구하기 위해 사용된 발산인자를 나타낸 것이다. 40Km 지점에서의 발산인자(0.9958)를 반사계수에 적용하여도 반사계수의 변화가 미약하기 때문에 수신 전계강도에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있다.



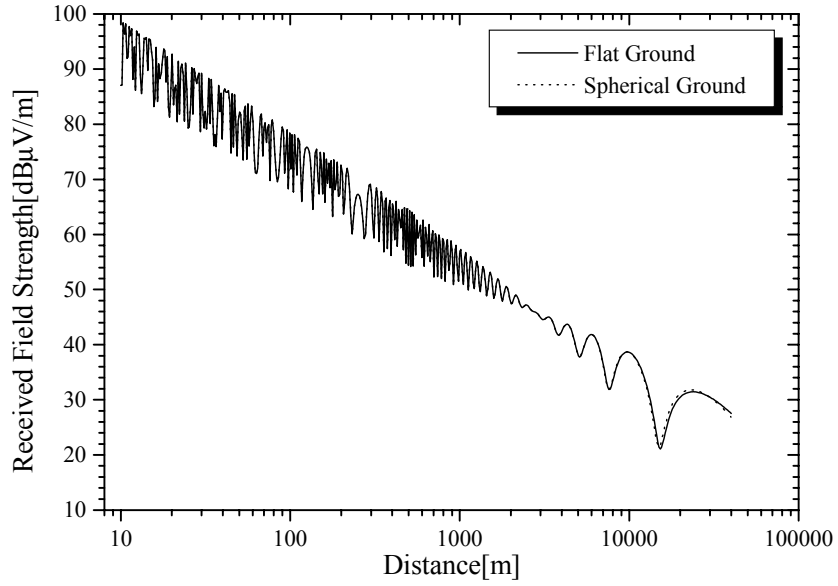


Fig. 4. Received field strength versus distance

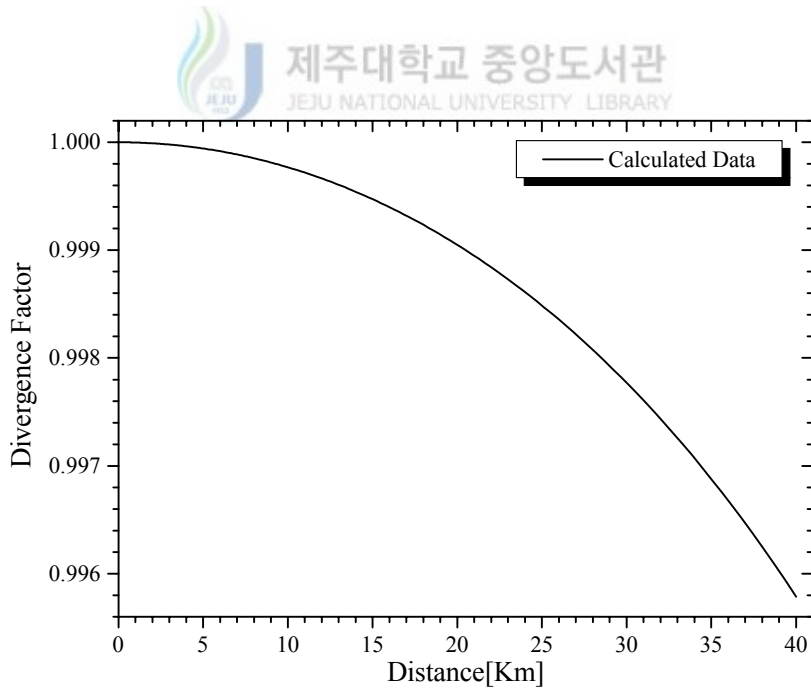


Fig. 5. Curve of divergence factor versus distance

### 3) 편파 특성에 대한 반사계수

수신 전계강도는 안테나의 편파 특성에 의해 다른 값을 갖게 되며 반사계수 또한 매질의 전기적 특성에 의해 다르게 나타날 것이다. Fig. 6은 전기적 특성이 서로 다른 두 매질의 경계면에서 2개의 입사 광선에 따른 반사 및 투과 현상을 나타내고 있다. 매질 1과 매질 2의 파동 임피던스는 각각  $\eta_1$ 과  $\eta_2$ 이고 유전상수가  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 일 때  $AB$  영역에 입사되는 전력과 반사되는 전력은 각각  $E_i^2 \cos \theta_1 / \eta_1$ 과  $E_r^2 \cos \theta_1 / \eta_1$ 에 비례하고 투과되는 전력은  $E_t^2 \cos \theta_2 / \eta_2$ 에 비례하므로 에너지 보존 법칙에 의해 다음의 관계가 유도된다.

$$\frac{E_r^2}{E_i^2} = 1 - \frac{\sqrt{\epsilon_2} E_i^2 \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_1} E_i^2 \cos \theta_1} \quad (24)$$

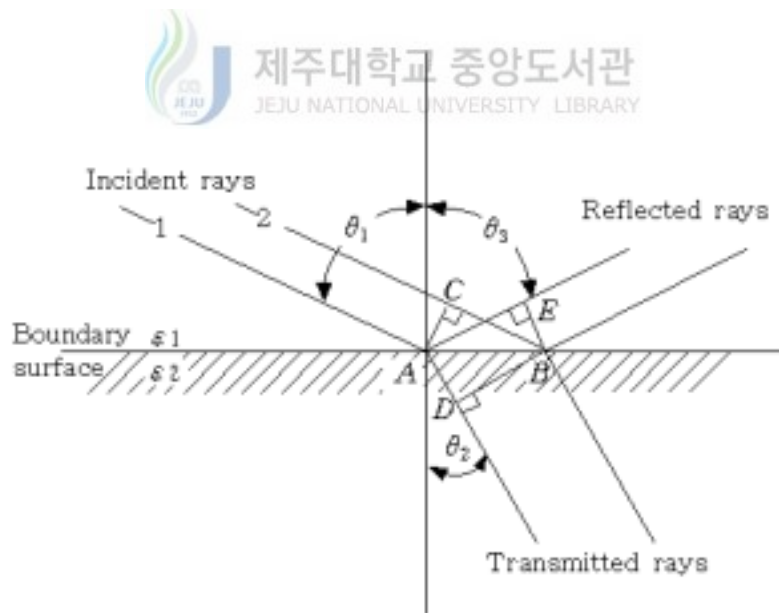


Fig. 6. Reflection of a plane wave on a flat surface

수평편파는 전계가 경계 표면에 평행한 경우이다. 입사 전계 ( $E_i$ )와 반사 전계 ( $E_r$ ) 그리고 투과 전계 ( $E_t$ )에 대해 경계면에서 전계의 접선 성분이 연속인 경계 조건을 적용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$E_i + E_r = E_t \quad (25)$$

Fig. 6에서  $AE$ 와  $CB$ 의 길이는 동일한 전파 이동 거리에 의해 같으므로 입사각 ( $\theta_1$ )과 반사각 ( $\theta_3$ )은 같고  $CB$ 와  $AD$ 의 길이 비와 매질에서 전파 속도 비의 관계로부터 다음과 같은 스넬(Snell)의 법칙이 얻어진다.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad (26)$$

식(24)를 식(25)에 대입하고 입사 전계와 반사 전계의 비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_2} \quad (27)$$

식(26)을 식(27)에 대입하면 수평편파에 대한 반사계수가 구해진다.

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{(\epsilon_2/\epsilon_1) - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{(\epsilon_2/\epsilon_1) - \sin^2 \theta_1}} \quad (28)$$

전자파가 자유공간에서 대지면으로 입사할 때 반사계수는 입사면에 대한 입사여각 ( $\phi$ )의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_h = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sin \phi - \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \cos^2 \phi}}{\sin \phi + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \cos^2 \phi}} \quad (29)$$

수직편파는 Fig. 6에서 전계가 경계면에 수직인 경우이다. 전계의 접선 성분이 경계에서 연속인 조건을 적용하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$(E_i - E_r) \cos \theta_1 = E_t \cos \theta_2 \quad (30)$$

식(24)를 식(30)에 대입하고 입사 전계와 반사 전계의 비를 구하면 다음과 같다.

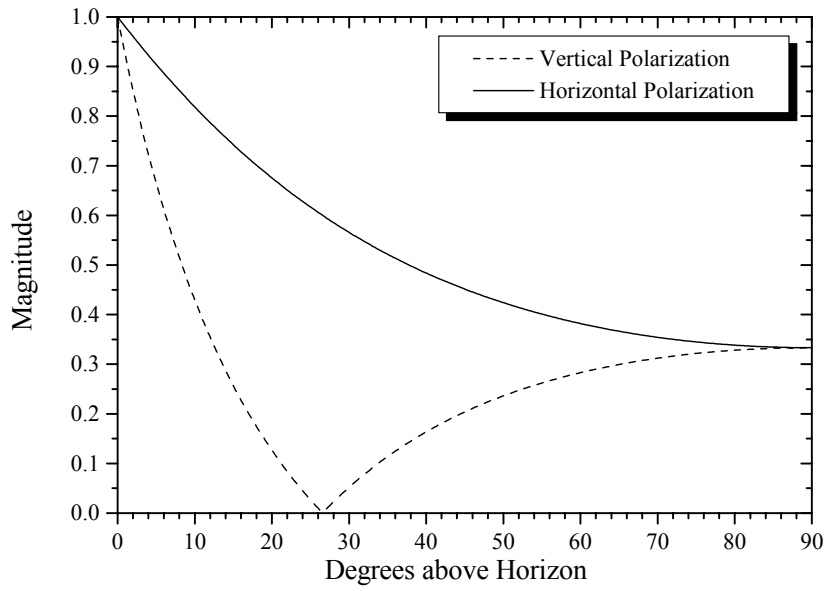
$$\rho_v = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_2}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_2 + \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_1} \quad (31)$$

식(31)에 스넬의 법칙을 적용하고, 전자파가 자유공간에서 대지면으로 진행하는 경우 대지면의 전기적 특성에 의한 반사계수는 입사여각에 대한 함수로 다음과 같다.

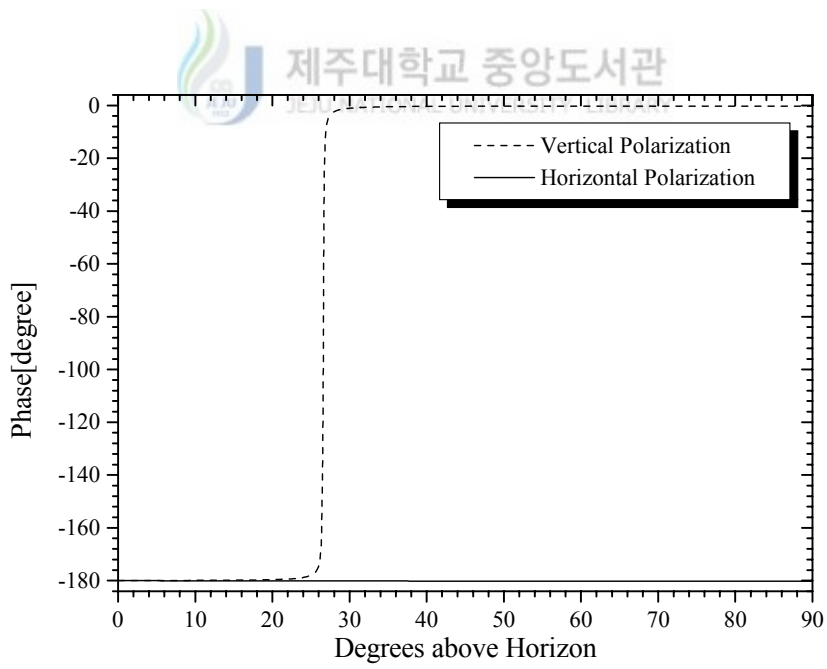
$$\rho_v = \frac{\left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \right) \sin \phi - \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} - \cos^2 \phi}}{\left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \right) \sin \phi + \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} - \cos^2 \phi}} \quad (32)$$

수평편파와 수직편파는 식(29)와 식(32)에서 확인할 수 있듯이 복소수이기 때문에 입사파와 반사파는 크기뿐만 아니라 위상도 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 입사여각에 대한 수직편파와 수평편파의 반사계수 변화를 나타낸 것이다. 식(29)와 식(32)의 반사계수에서 주파수는 324.75MHz이고 매질의 전기적 특성이 평균 대지일 때 반사계수의 크기와 위상이다. 일반적으로 제시하고 있는 평균 대지의 전기적 특성에서 도전율은 0.005S/m이고 유전상수는 15이다. 편파 특성에 대한 반사계수는 크기와 위상에서 매우 다른 값을 갖고 있다. 수평편파에서 반사파의 크기와 위상은 입사여각에 대하여 단조 감소하면서 임의의 값으로 수렴하고 있다. 이 값은 주파수와 유전상수에 따라 달라진다. 또한 위상은 입사여각에 관계없이 거의 180°이다.



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 7. Curves of reflection coefficients for average ground

수평편파의 반사 특성과 달리 수직편파에서 반사계수의 크기와 위상은 한 입사여각에서 반전 현상을 보이고 있다. 이 입사여각은 의사부뤼스터(Pseudo Brewster) 각으로 반사파의 크기는 최소가 되고 위상은  $-90^\circ$ 가 된다.  $0^\circ$ 에 가까운 입사여각에서 수평편파와 수직편파의 반사계수는 같으며 입사여각이  $90^\circ$ 인 경우 크기는 같고 위상은  $180^\circ$  차를 보인다. 이는 전계와 자계의 형태는 동일하나 방향이 다르기 때문이다.

### 3. 매질의 전기적 특성

매질의 전기적 특성은 반사파의 영향 분석에 있어서 매우 중요하다. 보편적인 분석 방법은 매질의 전기적 특성에 의한 이론적인 반사계수와 실험적인 반사계수의 비교로 이루어지며 실험적인 반사계수를 구하기 위해 지향 특성이 매우 예리한 안테나를 사용하여 직접파와 반사파를 따로 측정하고 있다. 본 절에서는 반파장 다이폴 안테나를 이용하여 수직편파 및 수평편파에 대한 반사계수 특성과 매질의 전기적 특성을 추출하는 방법을 제시하고자 한다.

#### 1) 전기적 특성과 주파수에 따른 반사계수 변화

굴곡이 없고 유한한 전기적 특성을 갖는 대지에서 반사계수는 입사 전계에 대한 편파 특성에 따라 구할 수 있다. 반사 매질이 대지면인 경우 반사계수는 대지의 유전상수와 도전율에 의해 변한다(Maclean과 Wu, 1993). 유전상수가  $\epsilon$ 이고, 도전율이  $\sigma$ 인 매질에 대해 Maxwell 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = \sigma E + \epsilon E' \quad (33)$$

시간에 따라 정현적으로 변하는 전기장의 변화는 다음과 같다.

$$E' = j\omega E_0^{j\omega t} = j\omega E \quad (34)$$

식(34)를 식(33)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\nabla \times H = \left( \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right) E' = \epsilon_c \epsilon_0 E' \quad (35)$$

그러므로 일부 도전성을 갖는 유전체는 다음과 같은 복소 유전상수를 갖는 유전체로 생각할 수 있다.

$$\epsilon_c = \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \quad (36)$$

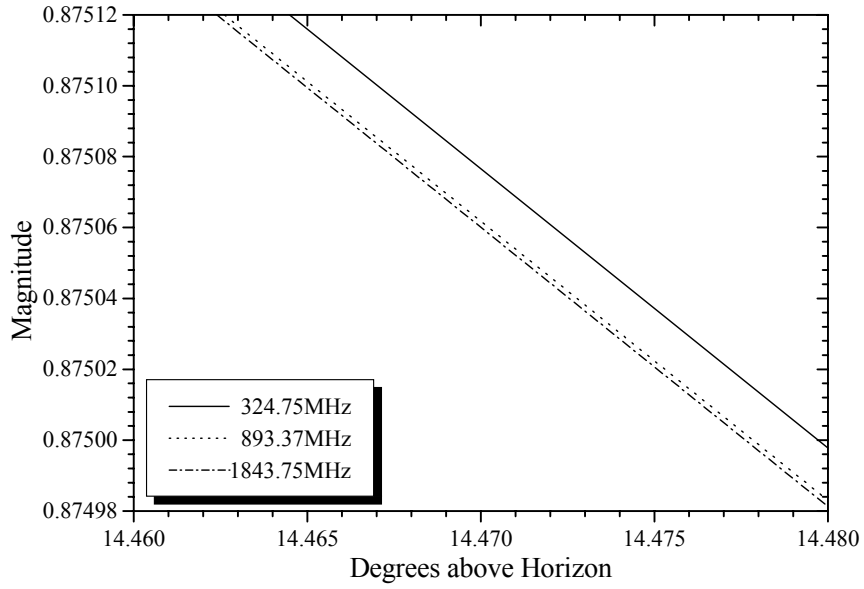
실제 전파 환경에서의 반사는 주로 대지면에서 발생하며 일반적으로 많은 논문에서 참고하고 있는 대지 상태에 따른 전기적 특성은 Table 1과 같다.



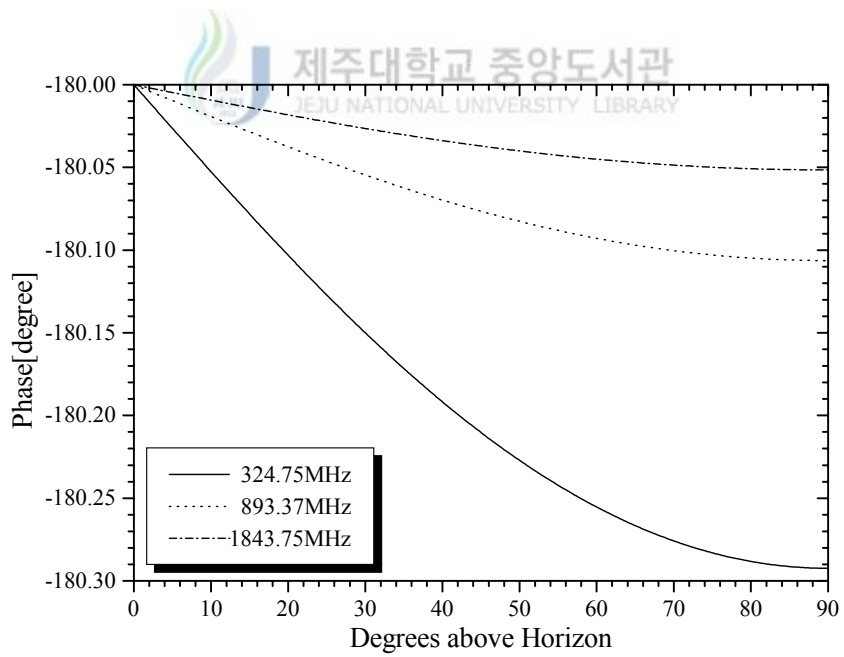
Table 1. Typical values of ground constants

Surface	Conductivity(S/m)	Dielectric Constant
Poor Ground	0.001	4~7
Average Ground	0.005	15
Good Ground	0.02	25~30

Fig. 8과 Fig. 9는 수평편파에 대한 반사계수의 변화이다. Fig. 8에서 반사매질은 평균 대지이고 주파수가 각각 324.75MHz, 893.37MHz, 그리고 1843.75MHz일 때 이에 대한 반사계수의 변화를 나타내었다. 또한 반사계수의 크기 변화를 명확하게 관찰하기 위해 입사각의 범위를 작게 하였다.



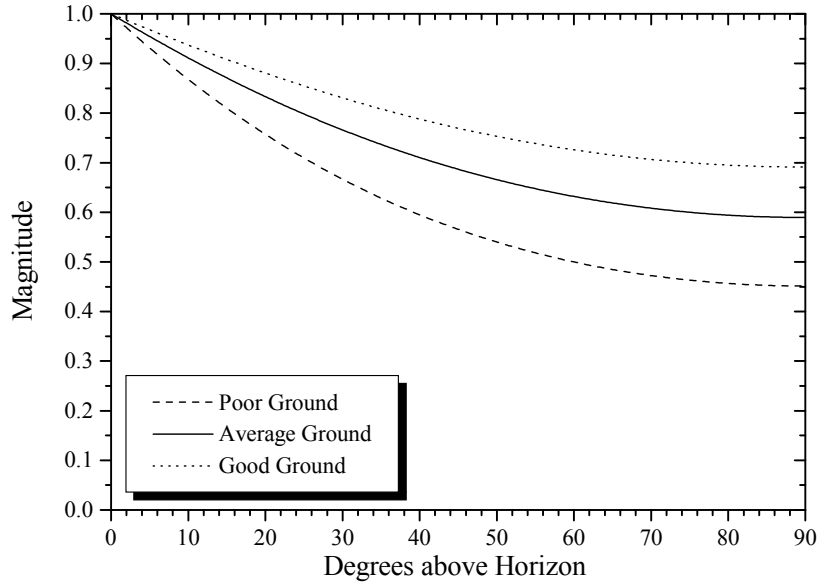
(a) Magnitude



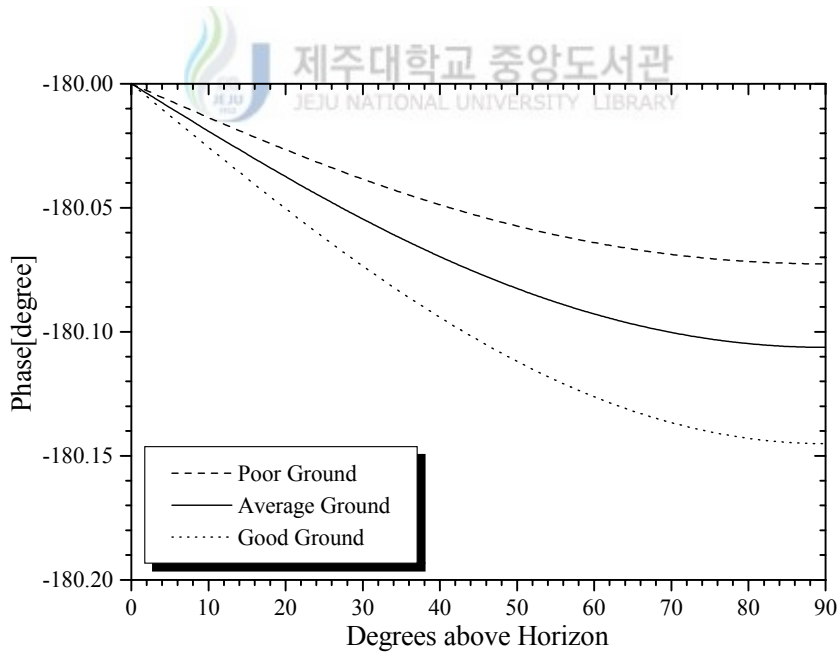
(b) Phase

Fig. 8. Curves of reflection coefficients  $\rho_h$  for three frequencies





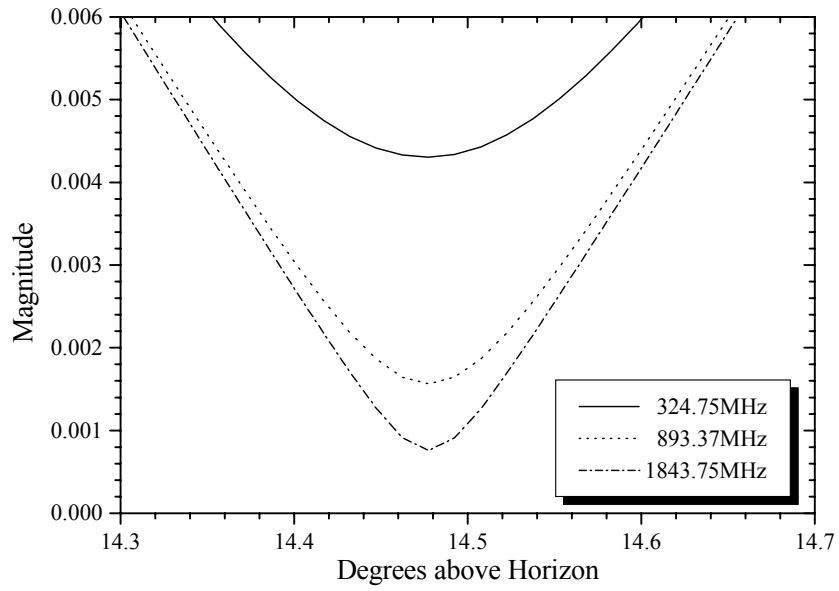
(a) Magnitude



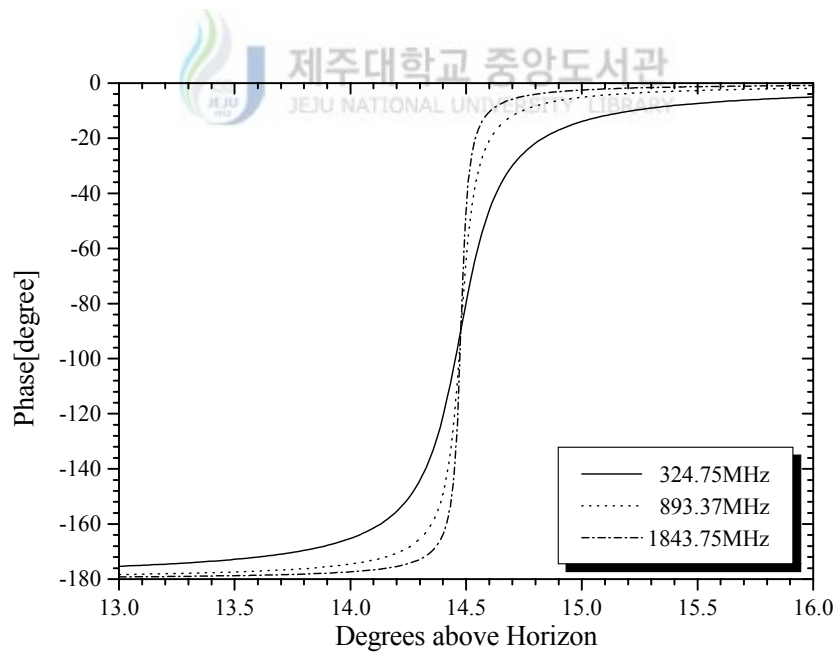
(b) Phase

Fig. 9. Curves of reflection coefficients  $\rho_h$  for ground constants

Fig. 8a는  $14.46^\circ$ 에서  $14.48^\circ$ 의 입사여각에 대하여 반사계수의 크기를 나타낸 것이다. 주파수  $324.75\text{MHz}$ 와  $1843.75\text{MHz}$ 에서 반사계수의 크기 차는  $0.00002$ 를 보여 주파수에 의한 영향이 무시될 수 있는 정도로 매우 작았다. Fig. 8b는 전 범위의 입사여각에 대하여 위상 분포를 나타낸 것이다. 주파수에 대한 위상은 저주파수일수록 큰 값을 가졌으나 그 변화 범위는 매우 작았고 두 주파수간 최대 위상 차는  $90^\circ$ 의 입사여각에서  $0.24^\circ$ 임을 알 수 있다. 이것으로부터 UHF 대역에서 수평편파에 대한 반사계수는 같다고 가정한다. Fig. 9는 주파수가  $893.37\text{MHz}$ 일 때 대지의 전기적 특성에 따른 반사계수의 변화를 나타낸 것이다. 대지 상태는 Table 1에 보이는 평균 대지와 건조한 대지, 그리고 습한 대지이다. 반사계수는 Fig. 8에서와는 달리 대지의 상태에 따라 크기와 위상이 변화한다. 반사계수의 크기는 입사여각이 증가할수록 단조 감소하였으며 건조한 대지일 때 변화 폭이 가장 컸다. 위상은 입사여각과 대지 형태에 관계없이 거의  $180^\circ$ 를 가졌다. 수직편파에 대한 반사계수의 변화는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 일반적으로 수직편파의 특성은 의사부위스터 각에서 변곡점이 발생한다. 이 입사여각에서 반사계수의 크기는 주파수에 따라 미세한 차이가 있지만 대부분 0으로 접근하며 위상은  $90^\circ$ 를 갖는다. Fig. 10은 대지 상태가 평균 대지일 때 주파수에 대한 반사계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10a는  $14.3^\circ$ 에서  $14.7^\circ$ 의 입사여각에 대한 반사계수의 크기를 나타낸 것으로 반사계수의 크기는 수평편파에서의 특성과 동일하게 발생하였다. 주파수에 의한 반사계수의 크기는 의사부위스터 각에서 가장 큰 차이를 보였으며  $324.75\text{MHz}$ 의 주파수에서 반사계수의 크기는 다른 주파수에서의 크기보다  $0.0025$ 의 큰 값을 가졌다. Fig. 10b에 나타낸 위상은 의사부위스터 각에서  $180^\circ$ 의 급격한 위상 변화가 있으며, 이 위상의 변화는 그림에서 관찰되듯이 저주파수일수록 완만하였다.

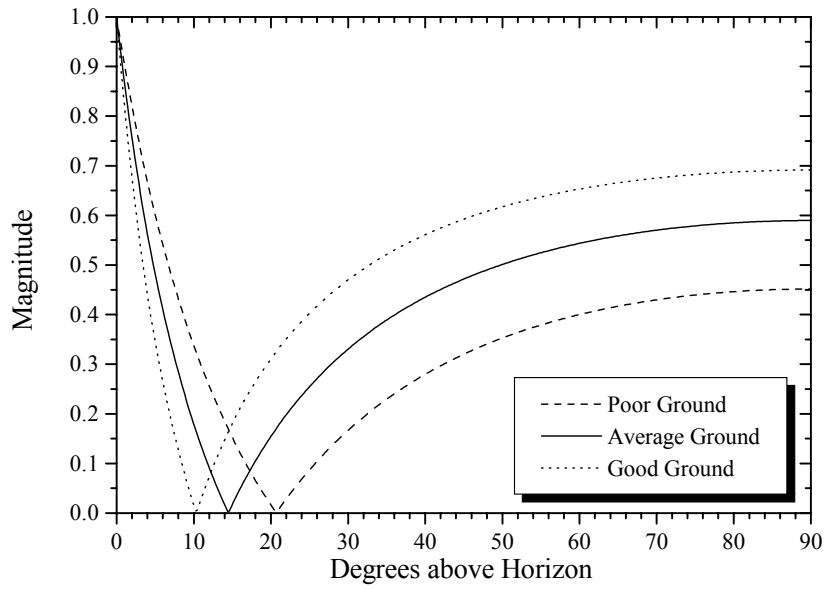


(a) Magnitude

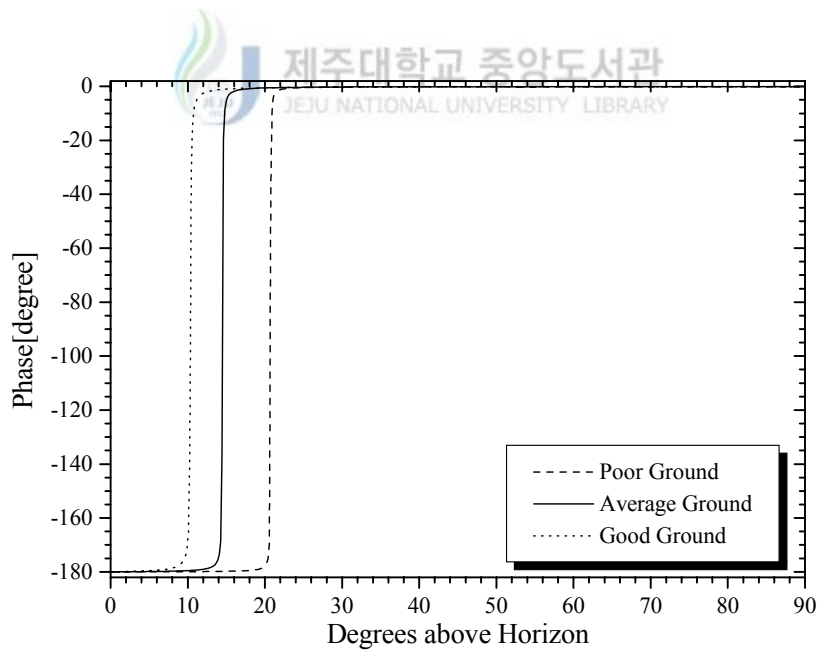


(b) Phase

Fig. 10. Curves of reflection coefficients  $\rho_v$  for three frequencies



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 11. Curves of reflection coefficients  $\rho_v$  for ground constants

Fig. 11은 주파수가 893.37MHz일 때 대지의 전기적 특성에 따른 반사계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11a에서 반사계수의 크기는 보편적으로 수평편파에 비해 크게 감소하고 의사부위스터 각보다 큰 입사여각에서는 단조 증가하였다. 또한 매질의 유전상수가 작을수록 의사부위스터 각은 큰 값을 가졌다. Fig. 11b에서 반사계수의 위상은 주파수에 의한 위상 변화와는 달리 미세하게 단조 감소하였고 매질의 전기적 특성에 의한 영향은 작았다. 수평편파 및 수직편파에 대한 반사계수의 크기는 90°의 입사여각에서 동일한 값을 가졌고 의사부위스터 각은 습한 대지에서 가장 작은 입사여각을 가졌다.

## 2) 반사계수에 대한 원의 방정식

수직편파와 수평편파에 대한 반사계수는 매질의 전기적 특성, 주파수, 그리고 입사여각의 함수이며 복소수이다. 동일한 환경에서 수직편파와 수평편파에 대한 반사계수는 크기와 위상이 서로 다르지만 매질의 복소 유전상수는 같다. 식(36)의 복소 유전상수를 각각 식(29)와 식(32)의 반사계수에 대입하여 정리하면 수직편파와 수평편파에 대한 반사계수는 다음과 같이 된다.

$$\rho_h = \frac{\sin \phi - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}}{\sin \phi + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}} \quad (37)$$

$$\rho_v = \frac{\epsilon_c \sin \phi - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}}{\epsilon_c \sin \phi + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \phi}} \quad (38)$$

식(37)과 식(38)의 반사계수에서 입사여각, 복소 유전상수 및 주파수가 동일하다면 복소 유전상수는 수직편파와 수평편파의 반사계수로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda = \frac{(1 + \rho_v)(1 - \rho_h)}{(1 + \rho_h)(1 - \rho_v)} \quad (39)$$

식(39)에서 양변은 모두 복소수이다. 좌변의 실수부와 허수부에 있는 미지수는 각각 도전율과 유전상수뿐이다. 그러므로 도전율과 유전상수는 우변의 반사계수 관계로부터 구할 수 있다. 반사계수는 수신 전력과의 관계를 가지며 수신 전력은 직접파와 반사파의 벡터 합으로 구할 수 있다. 직접파·반사파 모델에서 수신 전력파 반사계수는 다음과 같은 관계를 갖는다(Jakes, 1974).

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{r_1} e^{-jkr_1} + \rho_{h,v} \frac{1}{r_2} e^{-jkr_2} \right|^2 \quad (40)$$

여기서  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 직접 경로와 대지반사 경로의 길이이다. 그리고 반사계수는 복소수이므로 다음과 같이 놓는다.

$$\rho_{h,v} = \gamma_{h,v} + j\zeta_{h,v} \quad (41)$$

여기서  $\gamma_{h,v}$ 는 수평편파 ( $h$ )와 수직편파 ( $v$ )에 대한 반사계수의 실수 값이고  $\zeta_{h,v}$ 는 허수 값이다. 식(41)을 식(40)에 대입하고 반사계수의 실수부와 허수부에 대하여 정리하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(\gamma_{h,v} - r_r \cos kr_d)^2 + (\zeta_{h,v} - r_r \sin kr_d)^2 = \left( \frac{4\pi r_2 \sqrt{p_d}}{\lambda} \right)^2 \quad (42)$$

여기서  $k$ 는 전파상수이며  $r_d$ 는 직접 경로와 반사 경로의 길이차이고  $r_r$ 은 직접 경로길이와 반사 경로길이의 비이다. 그리고  $p_d$ 는 송신 전력과 수신 전력의 비를 나타내며 각각의 파라미터는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$r_r = \frac{r_2}{r_1} \quad (43a)$$

$$r_d = r_2 - r_1 \quad (43b)$$

$$p_d = \frac{P_r}{P_t} \quad (43c)$$

식(42)는  $(r_r \cos kr_d, r_r \sin kr_d)$ 의 중심과  $4\pi r_2 \sqrt{p_d}/\lambda$ 의 반경을 갖는 원의 방정식이다. 원의 중심과 반경은 주파수와 안테나 높이 및 거리의 함수이기 때문에 이들의 값에 따라 원의 중심은 변하게 되며, 원의 반경은 수신 전력을 알아야만 구할 수 있다. 전파 측정에서 안테나 높이, 거리, 그리고 송신 전력에 의해 수신 전력을 얻는다면 임의의 주파수에 대한 원의 반경 및 중심을 구할 수 있다. 원의 중심은 전파 경로길이와 주파수의 관계식이고 반경은 간접 경로길이 및 송신 전력과 수신 전력의 비의 관계이다. 그러므로 임의의 주파수에서 안테나 특성에 대한 원의 중심은 전파 경로길이의 변화가 없기 때문에 수평편파와 수직편파에서는 같으며 동일한 주파수일지라도 입사여각에서는 다른 값을 가지게 된다. 원의 반경은 동일한 송신 전력일지라도 편파 특성에 의해 수신 전력이 다르기 때문에 수평편파와 수직편파에서는 서로 다른 크기를 가지며 같은 주파수일지라도 입사여각의 변화가 있다면 반경은 간접 경로길이와 수신 전력의 변화에 의해 달라지게 된다. 임의의 주파수에 대한 원의 궤적은 입사여각에 대한 반사계수의 값을 포함하고 있기 때문에 2개 이상의 주파수에 대한 원의 궤적을 이용하면 반사계수의 값을 구할 수 있고, 편파 특성에 대한 반사계수를 얻는다면 매질의 전기적 특성을 추출할 수 있다.

Fig. 12는 입사여각이  $6.84^\circ$ 일 때 주파수에 따른 수평편파와 수직편파의 반사계수에 대한 원의 반경 변화를 나타낸 것이다. 반사계수의 반경은 편파 특성에 관계없이 주파수에 대해 정현적으로 변동하였다. 반경의 변동폭은 수평편파보다 수직편파에서 작으며, 동일한 입사여각에서는 수신 전력의 변동폭이 편파 특성에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다.

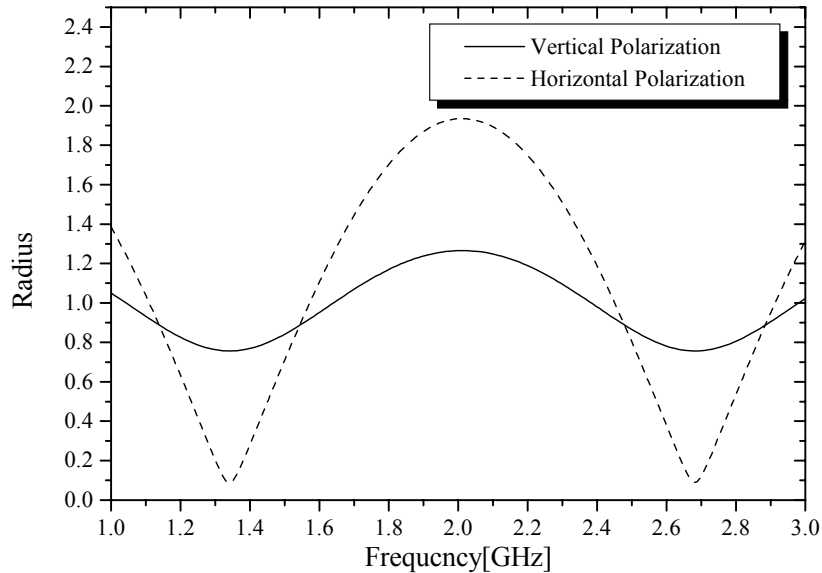
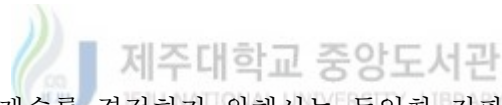


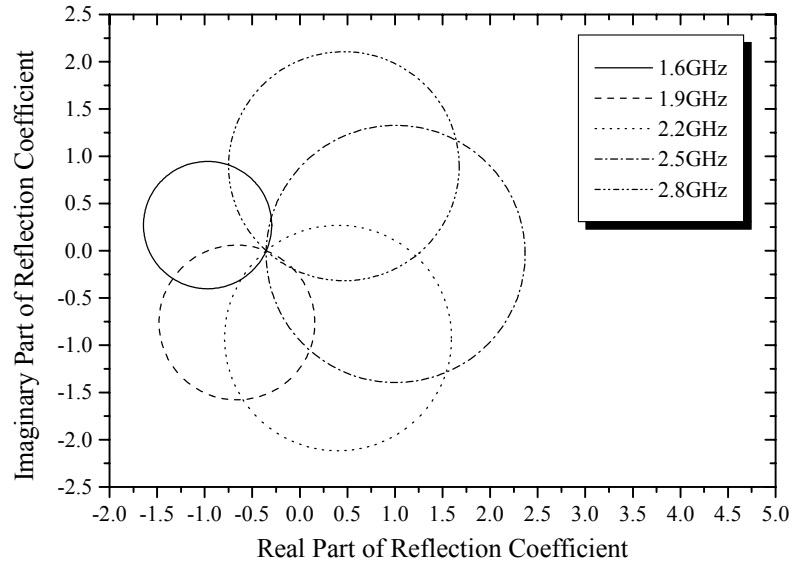
Fig. 12. Radius versus frequency by antenna polarization



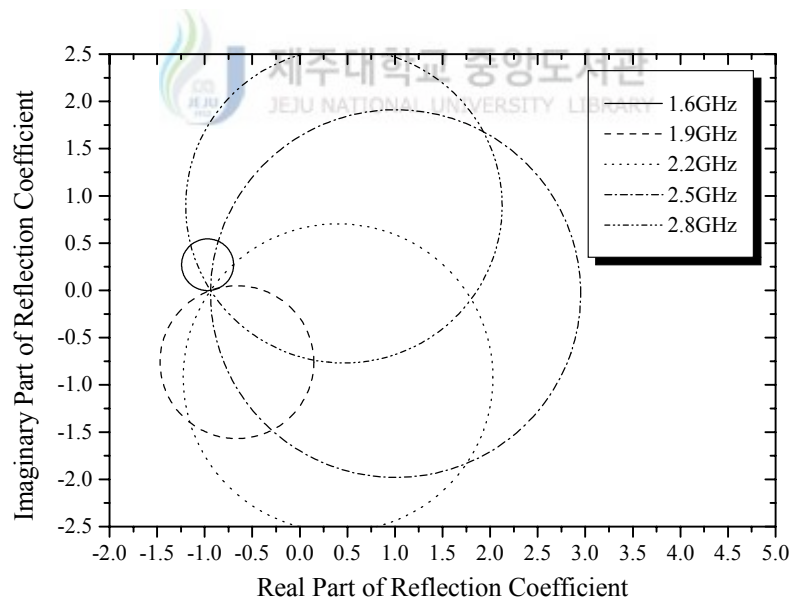
매질에 대한 반사계수를 결정하기 위해서는 동일한 전파 환경에서 여러 주파수에 대한 반사계수의 원이나 서로 다른 전파 경로를 갖는 환경에서 반사계수의 원이 필요하다. 주파수에 대한 반사계수의 원은 서로 교차하게 되며 이 교차점의 좌표들 중에서 한 좌표는 반사 매질에 대한 반사계수가 된다. 이와 같은 과정은 수평편파와 수직편파에서 동일하게 일어난다. 그러므로 매질의 전기적 특성은 식(42)로부터 구한 수평편파와 수직편파의 반사계수를 식(39)의 복소 유전상수에 대입함으로써 구할 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 주파수에 대한 반사계수의 궤적을 나타낸 것이다. 매질의 형태는 평균 대지로 가정하였고 주파수는 1.6GHz, 1.9GHz, 2.2GHz, 2.5GHz 그리고 2.8GHz이다. 그리고 송신 및 수신 안테나의 높이는 1.5m이고 입사여각에 대한 반경을 확인하기 위해 거리는 20m와 25m로 하였다.



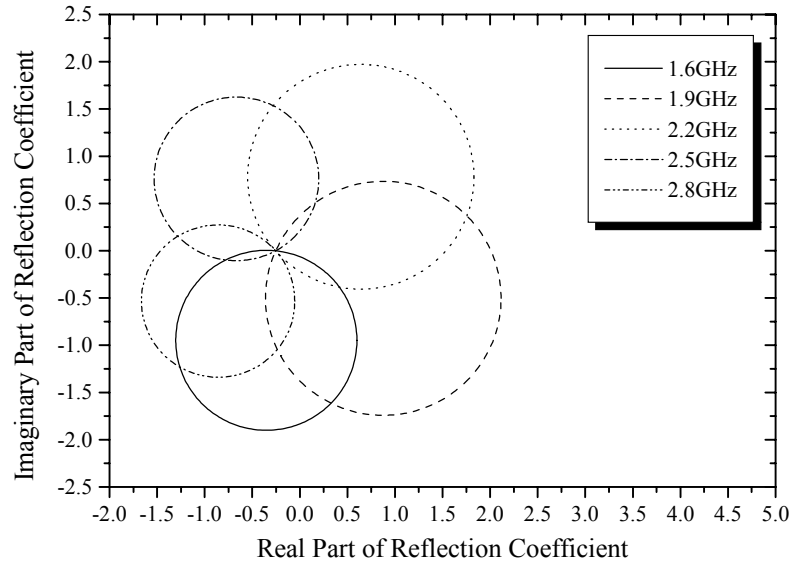


(a) Vertical polarization

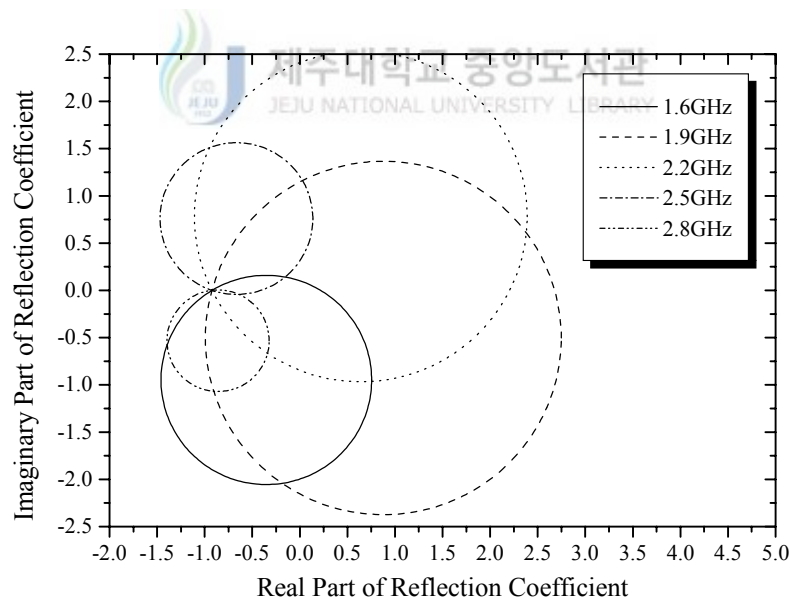


(b) Horizontal polarization

Fig. 13. Circles of reflection coefficients by various frequencies ( $h_1 = 1.5\text{m}$ ,  $h_2 = 1.5\text{m}$ ,  $D = 25\text{m}$ ,  $\phi = 6.84^\circ$ )



(a) Vertical polarization



(b) Horizontal polarization

Fig. 14. Circles of reflection coefficients by various frequencies ( $h_1 = 1.5\text{m}$ ,  $h_2 = 1.5\text{m}$ ,  $D = 20\text{m}$ ,  $\phi = 8.53^\circ$ )

Fig. 13은 입사여각이  $6.84^\circ$ 일 때 수직편파와 수평편파에 대한 반사계수의 변화이다. 각각의 주파수에서 수직편파와 수평편파에 대한 원의 중심은 동일한 전파 경로길이에 의해 같은 값을 가졌고 반경은 주파수와 편파 특성에 따라 서로 다른 값을 가졌다. 이에 대한 변화는 Fig. 12에 나타내었다. 주파수에 대한 반사계수의 원들은 그림에서 관찰되듯이 한 점에서 교차하고 있으며 이 좌표의 범위는 반사계수 특성으로 예측할 수 있다. 원 상의 한 좌표를  $(x, y)$ 라 할 때 반사계수에 대한  $x$ 와  $y$ 의 범위는 각각  $-1 \leq x \leq 1$ 와  $-1 \leq y \leq 1$ 이다. 반사계수의 위상 특성으로부터 교차점의 좌표는 수평편파인 경우 2사분면에 위치하고 수직편파에서는 3과 4사분면에 위치하며 입사여각이 의사부위스터 각보다 작을 때는 3사분면에 위치한다. 이들 좌표의 값은 입사여각에 대한 수직편파와 수평편파의 반사계수이고, 이 반사계수를 식(39)의 복소 유전상수에 적용하여 매질의 전기적 특성을 구하였다.

Fig. 14는 입사여각이  $8.53^\circ$ 일 때 반사계수의 궤적을 나타낸 것이다. 원의 중심과 반경은 같은 주파수일지라도 입사여각에 의해 직접 경로길이와 반사 간접 경로길이가 달라지기 때문에 Fig. 13에서의 값과 다르게 되며 교차 좌표 또한 다른 지점에서 발생하였다. 반사계수는 입사여각의 함수이기 때문에 다른 값을 가졌으나 반사 매질의 전기적 특성은 동일한 값을 가졌다.

Fig. 13과 Fig. 14에서 매질의 전기적 특성에 대한 계산 결과는 가정한 평균 대지의 전기적 특성과 일치하였으며 Table 2에 나타내었다. 그러므로 동일한 환경에서 수직편파와 수평편파에 대한 수신 전계강도 측정이 이루어진다면 반사 매질의 전기적 특성을 추출할 수 있다.

Table 2. Calculated values of electrical characteristics for average ground

Degree above Horizon		6.84	8.53
Cross Point (2.2GHz)	Vertical Polarization	-0.3537264369317 -0.0004363472395i	-0.2544998588765 -0.0005032878025i
	Horizontal Polarization	-0.9383101451956 0.0000687339428i	-0.9237681867759 0.0000865509559i
Average Ground	Dielectric Constant	15	
	Conductivity (S/m)	0.005	
Calculated Value	Dielectric Constant	14.99756	15.00589
	Conductivity (S/m)	0.00536	0.00503

#### 4. 회절 현상



무선통신 시스템에서 송신국과 이동 단말기 사이에는 항상 가시거리 환경만이 이루어질 수는 없다. 송신국과 수신 단말기 사이에 직접 경로를 방해하는 장애물이 있는 환경에 대한 전자파 전파 특성은 회절 현상으로 해석한다. 이와 같은 경우 전파 경로상의 장애물의 수에 따라 단일 장애물과 다중 장애물에 대한 분석이 이루어지며 이와 같은 장애물로 인한 회절손실을 구하는 방법에 대하여 설명한다.

##### 1) 프레넬(Fresnel) 영역

호이겐스(Huygens) 원리는 파동의 마루를 이루는 곡선을 파면이라 하여 파면

의 각 지점들이 파원이 되어 구면파를 발생시키고 무수히 많이 발생하는 이차 구면파가 겹쳐서 만드는 포락선이 다음 파면을 형성한다는 것이다. 이차 파원이 장애물에 의해 흡수되거나 가려질 경우 나머지 파원에 의해 형성되는 파면은 원래의 전파 방향으로 형성되는 것이 아니라 장애물 후방의 음영 부분으로 형성된다. 따라서 파원 각각에 대한 크기 분포는 회절 크기에 영향을 주기 때문에 직접 경로의 장애 조건에서 수신 전계강도는 장애물 뒤편에 형성되는 이차 파면에 대한 전계 성분의 벡터 합으로 구할 수 있다.

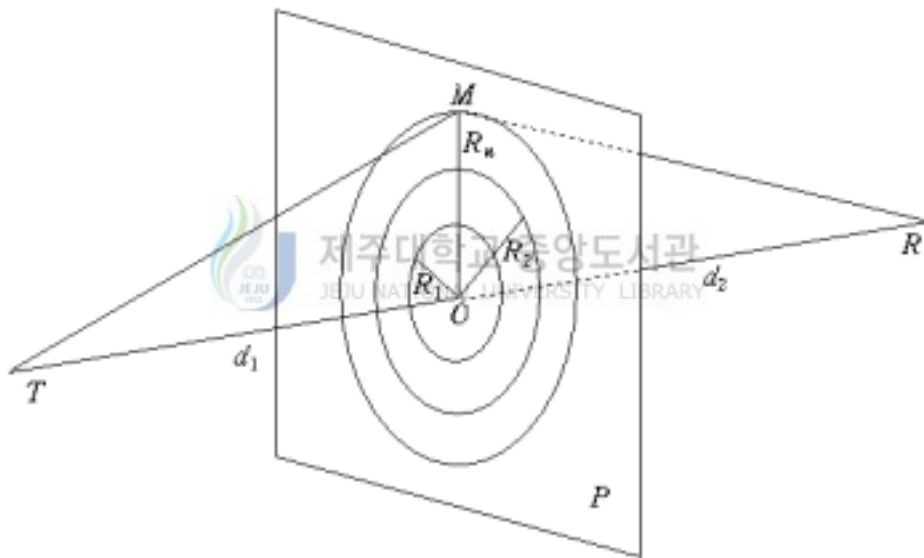


Fig. 15. Fresnel zones at a given point on the propagation path

Fig. 15에서  $T$ 와  $R$ 사이의 직접 경로를 가로막는 평판  $P$ 가 놓여있다고 가정하면 이 평판에는 중심이  $O$ 이고 임의의 반경을 갖는 원들을 구성할 수 있다. 즉, 평면  $P$ 에 분포한 원들은 점  $T$ 와 점  $R$ 을 초점으로 하는 타원 방정식으로부

터 다양하게 발생하며, 원들간의 경계는 장축 길이와 두 초점간의 거리 차가 반파장의 배수가 되는 타원 궤도에 의해 정의된다. 평면  $P$ 에 있는 임의의 원 상의 한 점을  $M$ 이라 할 때 간접 경로  $TMR$ 의 길이는 송신점  $T$ 에서 점  $M$ 까지의 길이와 점  $M$ 에서 수신점  $R$ 까지의 길이 합이며 직접 경로  $TOR$ 과의 길이 차는 일정하다. 이 값을 경로차  $r_o$ 로 놓으면 다음과 같다.

$$r_o = \sqrt{d_1^2 + R_n^2} + \sqrt{d_2^2 + R_n^2} - (d_1 + d_2) \quad (44)$$

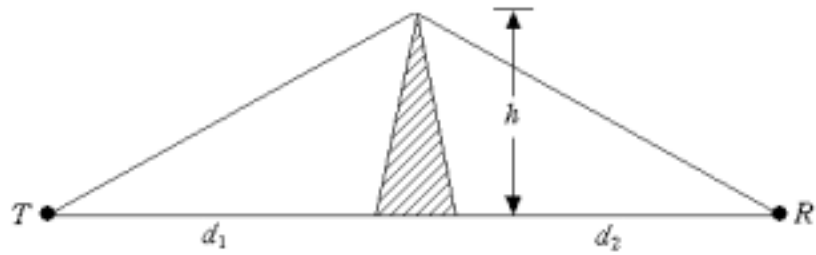
여기서  $d_1$ 과  $d_2$ 는 각각 선분  $TO$ 와 선분  $OR$ 의 길이이고  $R_n$ 은  $n$ 번째 원의 반경이다.  $d_1 \gg R_n$ ,  $d_2 \gg R_n$ 인 조건에서 경로차에 대한 근사식은 이항급수 전개식에서 2차 항까지 고려하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_o \approx \frac{R_n^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \quad (45)$$

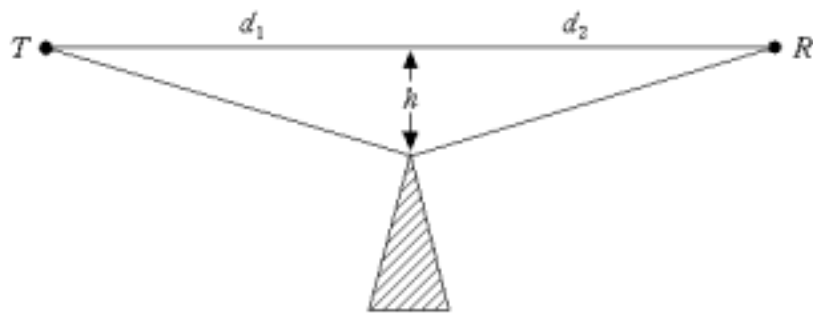
경로차  $r_o$ 가  $n\lambda/2$ 일 때 점  $M$ 의 궤적은 직접 경로상에 위치한 점  $O$ 를 중심으로 하는 원들이며 이 원들의 반경을  $n$ 차 프레넬 반경이라 한다. 자유공간 조건하에서 전송되기 위해서는 장애물이 없는 1차 프레넬 영역을 유지하여야 한다. 만약 1차 프레넬 영역을 침범하는 장애물이나 대지면이 있다면 이로 인하여 부가손실이 발생하게 되고 전파 경로상의 장애물에 의한 영향은 경로간의 프레넬 반경으로 평가를 할 수 있다.

## 2) 단일 장애물

단일 장애물 조건은 하나의 장애물이 전파 경로상의 1차 프레넬 영역을 침범하는 경우이다. Fig. 16은 송신점과 수신점 사이에 높이가 서로 다른 장애물이 1차 프레넬 영역을 침범하는 상태를 표현한 것이다.



(a)  $h$  and  $v$  negative



(b)  $h$  and  $v$  positive

Fig. 16. Geometry for propagation over knife-edge

Fig. 16a는 송신점과 수신점 사이의 직접 경로를 가로막는 장애물이 있는 경우이며 회절 높이( $h$ )와 회절계수( $v$ )는 음수이다. 회절 높이는 직접 경로의 높이와 장애물 높이의 차이이다. Fig. 16b는 전파 경로상에 장애물이 가로로 놓여있지만 직접 경로를 차단하지 않고 1차 프레넬 영역을 침범하는 경우이며 회절 높이와 회절계수는 양수이다. 여기서 회절계수와 경로길이 차이에 의한 위상차의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{\pi}{2} v^2 \quad (46)$$

이로부터 송신점과 수신점에서 장애물까지의 거리, 회절 높이, 그리고 파장을 적

용하여 Fresnel-Kirchhoff 회절계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (47)$$

따라서 회절 현상이 발생하는 경우의 수신 전계강도는 장애물상의 2차 호이겐스 전원의 합이며 다음의 복소 프레넬 적분으로 구해진다(Jordan,1968).

$$E = \frac{E_o(1 + j)}{2} \int_v^\infty \exp\left(-j\frac{\pi}{2} t^2\right) dt \quad (48)$$

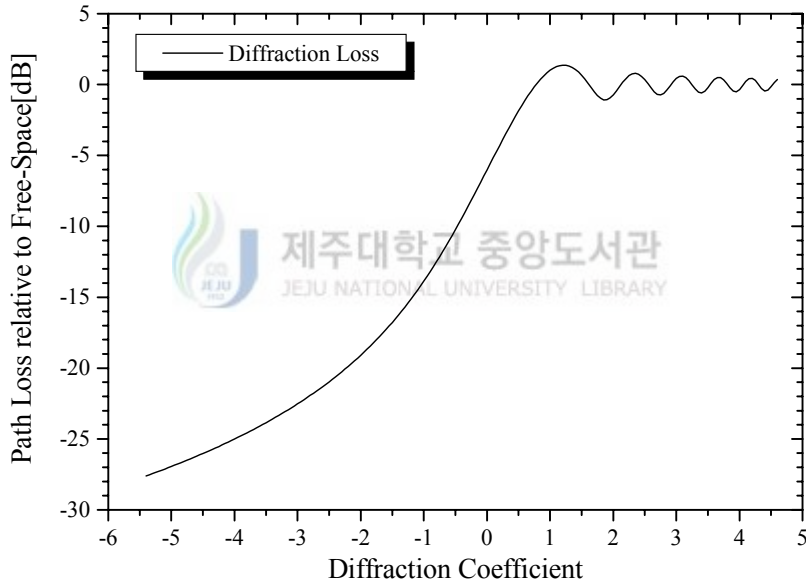


Fig. 17. Diffraction loss over a single knife-edge as a function of parameter  $v$

Fig. 17은 단일 장애물에 의하여 발생하는 회절손실을 나타낸 것이다. 회절손실은 1.22의 회절계수를 기준으로 이전 범위에서는 단조 증가하며 그 이후 회절계수 범위에서는 발진하면서 자유공간 전계강도로 수렴한다.



### 3) 다중 장애물

두 개 혹은 그 이상의 장애물에 대한 회절 현상을 분석하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이와 같은 문제는 각각의 장애물에 대한 이중 프레넬 적분으로 유도할 수 있으며 장애물에 대한 구조적 해석 방법으로도 접근할 수 있다. 장애물에 대한 구조적 해석 방법은 Bullington(1977) 방법, Epstein-Peterson (1953) 방법, 그리고 Deygout(1966) 방법 등이 있다.

#### (1) Bullington 등가 변환 방법

Bullington 방법은 Fig. 18과 같이 송신점과 수신점 사이에 위치한 다중 장애물에서 송신점과 수신점으로부터 장애물 뺄기간의 경로  $TA$ 와  $RB$  선분을 연장하여 그렸을 때 각 선분이 교차하는 점에 실제의 다중 장애물을 대신하는 하나의 등가 장애물을 두는 방법이며, 이 등가 장애물에 의한 회절손실을 고려한다. 이 방법은 각각의 장애물에 의한 회절손실을 고려하지 않고 하나의 등가 장애물에서의 회절손실을 구하기 때문에 계산 방법은 간단하나 수신 전계강도에서 오차가 발생하게 된다.

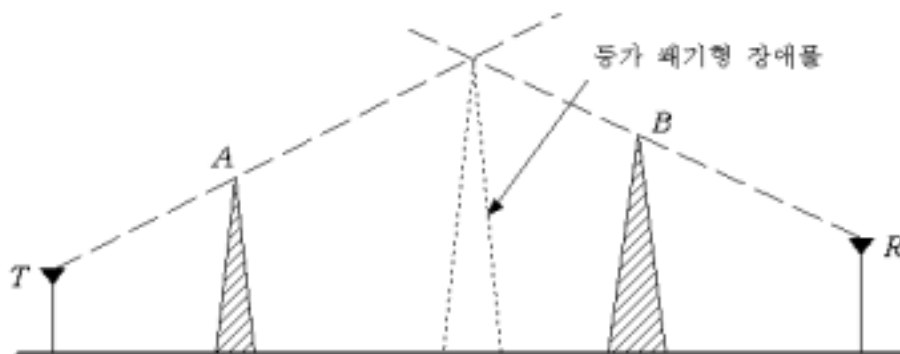


Fig. 18. Bullington's equivalent knife-edge

(2) Epstein-Peterson 방법

Epstein-Peterson 해석 방법은 Bullington의 해석 방법에서 무시해서는 안 될 장애물을 무시하는 경우에 발생하는 단점을 보완하기 위하여 Fig. 19에 보이는 것처럼 세 가지 경로  $TAB$ ,  $ABC$ ,  $BCR$ 에 대하여 각 장애물에서의 손실을 순차적으로 계산하는 방법이며, 전체손실은 각 장애물에 의한 손실의 합으로 구한다.

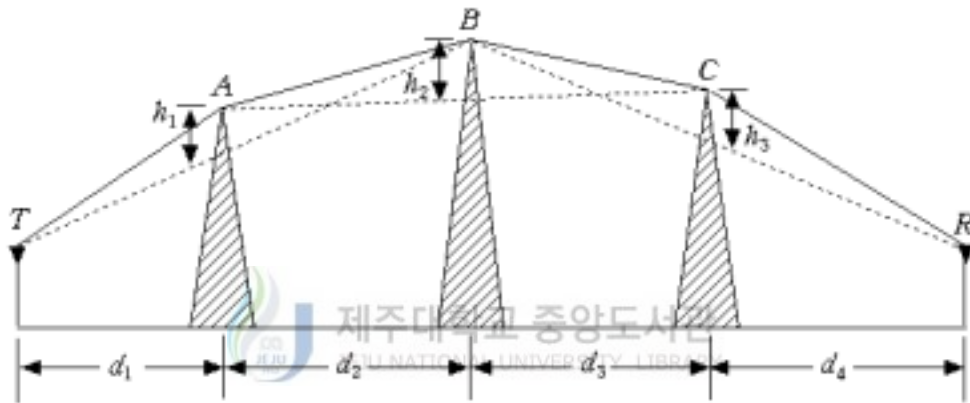


Fig. 19. Geometry of Epstein-Peterson's diffraction construction

(3) Deygout 방법

Deygout 해석 방법은 Fig. 20과 같이 경로  $TAR$ ,  $TBR$ ,  $TCR$ 에 대하여 각각의 회절계수를 계산하고 회절계수가 가장 큰 값을 갖는 장애물을 기준 장애물로 선정하는 방법이다. 만약  $B$ 가 기준 장애물이 된다면 회절손실은  $B$ 를 수신점으로 하였을 때 장애물  $A$ 에서의 손실과  $B$ 를 송신점으로 하였을 때 장애물  $C$ 에서의 회절손실, 그리고 기준 장애물에 의하여 발생하는 회절손실의 합으로 계산된다. 이 방법으로 회절손실을 구하면 정확한 해를 구할 수 있으나, 장애물들이 가깝게

위치한 다중 장애물 환경에서는 큰 오차가 발생한다.

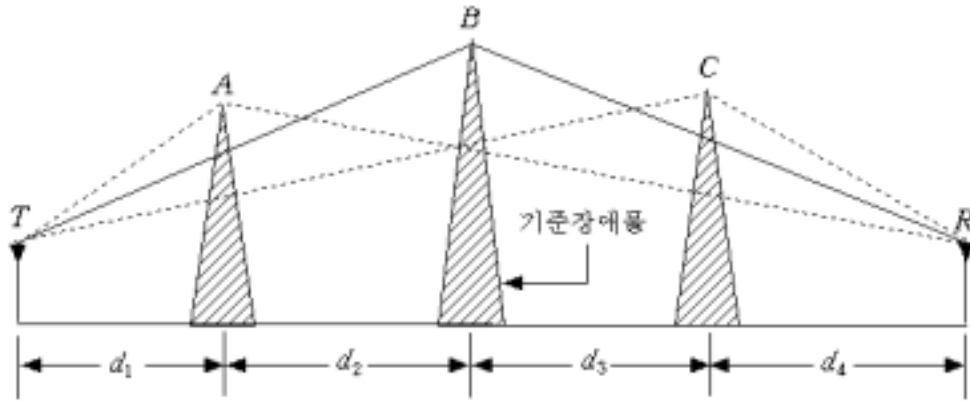


Fig. 20. Geometry of Deygout's diffraction construction

### Ⅲ. 예측 모델 및 알고리즘

다양한 환경에서 전파의 평균 수신 신호강도나 경로손실을 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 주어진 환경에서 예측에 필요한 파라미터의 적절한 선택이 중요하며 파라미터들이 적합한지의 여부를 판단하여야 한다. 본 논문에서는 서비스 영역의 전파 환경에 적절한 파라미터를 선정하여 예측모델을 제시하였으며 전파 환경은 대지면의 특성에 따라 초지 지역, 산림 지역, 도심 지역으로 구분하였고, 전파 경로에 따라 가시거리 환경과 회절 환경으로 구분하였다.

#### 1. 가시거리 예측모델

대지면은 평탄하거나 굴곡을 가지면서 불규칙한 경사를 이루기 때문에 형태가 다양하다. 이와 같은 환경에서 전파의 반사는 평탄한 대지에서의 분석 방법과 동일하게 적용할 수 없기 때문에 이러한 지형의 전파 특성을 분석하여 적합한 파라미터를 제시하고자 한다.

##### 1) 가시거리 예측모델

실제 지형에서의 전파의 반사 현상은 불규칙한 지형 분포를 갖는 대지면상에서 이루어지기 때문에 평탄한 대지에서의 직접파·반사파 모델을 적용하는 것은 부적합하며, 불규칙한 지형 분포를 나타낼 수 있는 방법이 필요하다. 그러므로 실제 지형을 적합하게 표현할 수 있는 파라미터를 제시하여 가상 평면을 구성하고 평탄한 대지에서의 직접파·반사파 모델을 가상 평면에 의해 가시거리 예측모델로

변형하였다.

Fig. 21은 굴곡이 있고 경사를 갖는 송신점에서 수신점 사이의 지형 프로파일이다. 평탄한 대지모델이나 구면 대지모델에서의 반사는 거리가  $D$ 인 수평면상에서 발생하며 경사를 갖는 지형에서는  $AB$ 의 경사면상에서 이루어지기 때문에 실제 지형을 지형 기울기를 갖는 평면으로 변형하여야 한다.

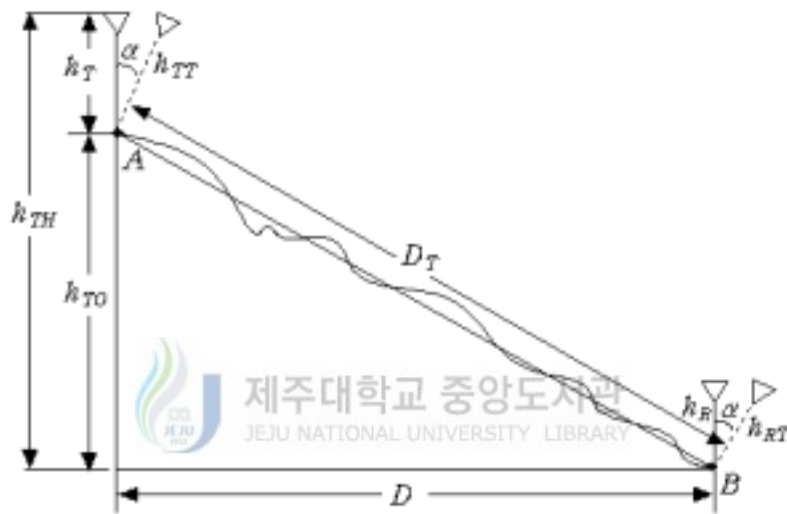


Fig. 21. Propagation paths over a inclined surface

평탄한 대지에서 전파 특성 분석에 적용되는 파라미터는 지형 기울기( $\alpha$ )에 의해 변하게 되며 송신 안테나와 수신 안테나의 높이, 송신점에서 수신점까지의 거리는 지형 기울기에 의해 다음과 같이 정리할 수 있다(이 외, 1996).

$$h_{TT} = \frac{h_T}{\cos \alpha} = \frac{(h_{TH} - h_{TO})}{\cos \alpha} \quad (49)$$

$$h_{RT} = \frac{h_R}{\cos \alpha} \quad (50)$$

$$D_T = \frac{D}{\cos \alpha} \quad (51)$$

따라서 직접 경로와 간접 경로의 길이 차에 의하여 발생하는 지연각은 변환된 파라미터에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_T = \frac{4\pi h_{TT} h_{RT}}{\lambda D_T} = \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda D \cos \alpha} \quad (52)$$

식(52)를 평탄한 대지에서의 직접파·반사파 모델에 적용하면 다음과 같이 변형된 가지거리 예측모델을 구할 수 있다.

$$E_T = E_o \sqrt{1 + \rho_T^2 - 2\rho_T \cos(\delta_T + \phi_{\rho_T} - \pi)} \quad (53)$$

여기서 반사계수는 지형 기울기에 의해 입사각이 변화하기 때문에 값이 달라지게 되며 특히 자유공간 전계강도는 송신 안테나의 높이 변화에 의해 큰 차이를 보인다.



## 2) 지형 기울기

실제 전파 경로상이나 대지면의 환경은 매우 다양하기 때문에 보다 정확한 전파 특성을 예측하기 위하여 제주 지역의 지형 및 대지면의 환경 특성을 데이터로 구축하여 이를 바탕으로 지형 특성에 적합한 파라미터를 분석한다.

제주 지형의 분포는 1950m의 한라산을 중심으로 368개의 오름이 산재해 있으며 동서 방향은 3°에서 5°의 경사를 이루며 남북으로는 5°에서 7°의 경사를 갖는다. 특히 고도에 따른 경사는 20° 이상의 가파른 지형이 분포된 고산 지대(1,200m에서 1,950m)와 10°에서 20°의 경사가 있는 산악 지대(600m에서 1,200m), 경사도가 5°에서 10°인 중산간 구릉 지대(200m에서 600m), 그리고 경사도가 5° 미만인 평원 지대(200m이하)로 분포되어 있다. 이와 같은 지형

에서의 대지 반사는 평탄한 대지에서의 반사 현상과는 달리 지형을 고려하여 분석하여야 한다. 전계강도 예측에 있어서 송신점과 수신점간의 지형 프로파일뿐만 아니라 장애물의 수와 위치 그리고 경로길이에 의한 경로손실 계산 등이 필요하다. 지형 데이터는 위도와 경도 그리고 지형 높이를 나타낼 수 있도록 구성되어야 한다. 제주도는 세로 축으로 16.5에서 58의 범위와 가로 축으로 121.25에서 195.5의 범위 내에 위치한 TM(Transverse Mercator) 좌표로 나타낼 수 있다. TM 좌표는 타원체에 원통을 둘러싸우고 타원체면을 원통면 상에 투영한 후 펼친 평면의 좌표이다. 25,000 축척 지형도의 TM 좌표에서 간격 0.25는 실제 거리로 250m에 대응한다. 본 논문에서는 0.25간격의 지형 높이로 지형 데이터를 구성하였다. 250m 간격으로 표본화된 지형 데이터를 보다 자세한 지형 데이터로 표현하기 위하여 컨벡스(convex) 조합식을 이용한 선형 보간법을 사용하였다. 그리고 오름 데이터는 제주 지형의 오름들이 독립된 기생화산들이기 때문에 보간법을 적용한 지형 데이터에 위치 및 고도를 입력하였다. 지형 데이터의 크기는 167×298이며 보간법을 적용하여 1,661×2,971까지 확장하였다.

Fig. 22a는 컨벡스 함수를 이용한 보간법을 일차원 구조에 적용하는 경우를 나타낸 것이다. 컨벡스 조합을 이용한 선형 보간법은 두 점  $a$ 와  $b$ 의 고도가 알려진 경우 두 점 사이에 존재하는 모든 점의 고도에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_z = \xi h_a + (1 - \xi) h_b \quad (54)$$

여기서  $\xi$ 는 0과 1사이의 값으로 두 점  $a$ 와  $b$  사이의 거리를 1로 정규화시킬 경우에 점  $a$ 와 점  $z$  사이의 정규화된 거리이다. 이 방법은 선형 보간법과 일치하며, 이차원 평면에 대한 확장은 선형 보간법보다 쉽게 표현할 수 있다. Fig. 22b는 이차원에 대한 선형 보간법을 나타낸 것이다. 각 선분에서 두 점에 대한 보간

고도를 일차원 보간법으로 구하면 점  $Z$ 의 고도는 다음과 같다.

$$h_z = \frac{\xi_2 h_{AZ} + (1 - \xi_2) h_{CZ}}{2} + \frac{\xi_1 h_{BZ} + (1 - \xi_1) h_{DZ}}{2} \quad (55)$$

여기서  $h_{AZ}$ 는 점  $A$ 와 점  $B$ 사이의 보간 고도이며  $h_{BZ}$ 는 점  $B$ 와 점  $C$ 사이의 보간 고도,  $h_{CZ}$ 는 점  $C$ 와 점  $D$ 사이의 보간 고도,  $h_{DZ}$ 는 점  $D$ 와 점  $A$ 사이의 보간 고도이다. 이와 같은 보간법이 적용된 지형 데이터는 비록 선형 보간법을 적용하였지만 이차원에서의 선형 보간법보다 계산시간이 줄어들며 주위 4방향의 고도를 모두 이용하므로 실제 지형을 비교적 정확하게 모델링할 수 있다.

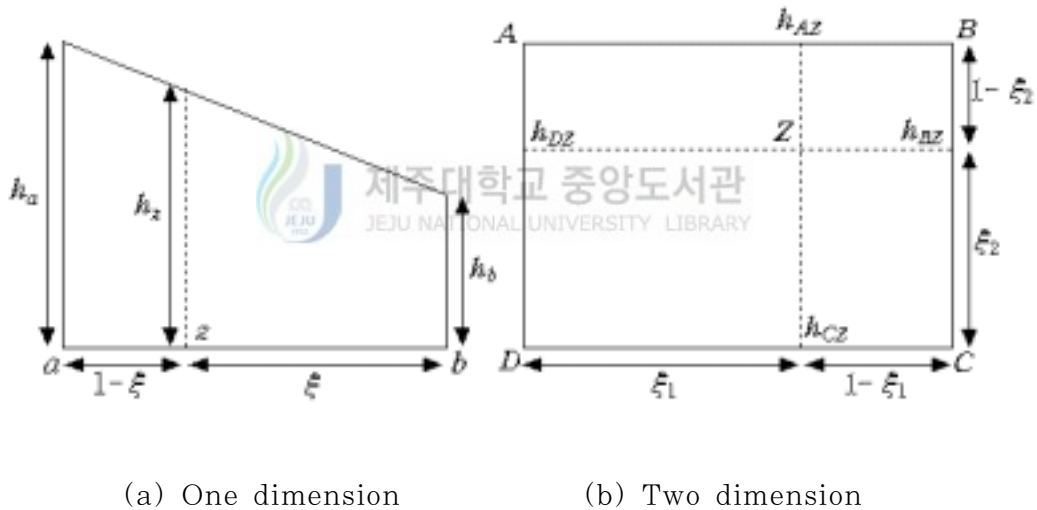


Fig. 22. Linear interpolation using convex combination

Fig. 23은 제주 지형을 20m의 등고선 간격으로 구분하여 데이터 베이스를 구축한 제주 지형도를 나타낸 것으로 앞에서 제시한 제주 전 지역의 지형 분포를 알 수 있다.



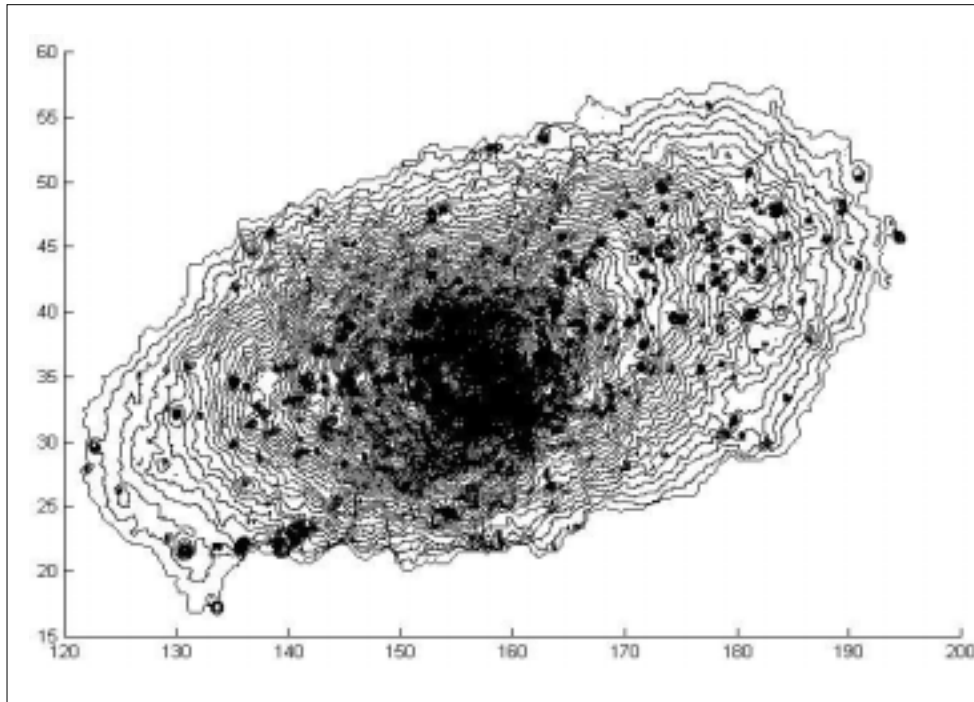
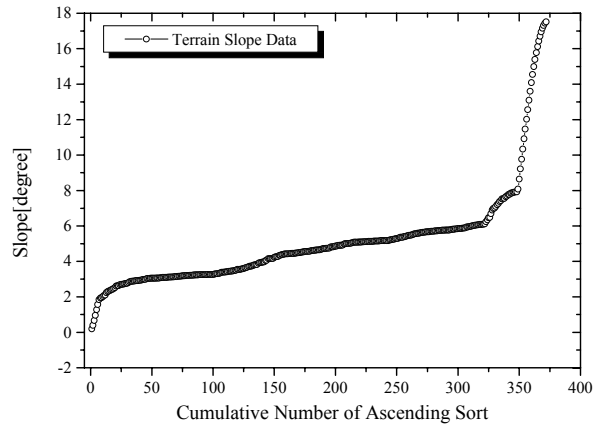



 Fig. 23. Contour line of Cheju  
 제주대학교 중앙도서관  
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

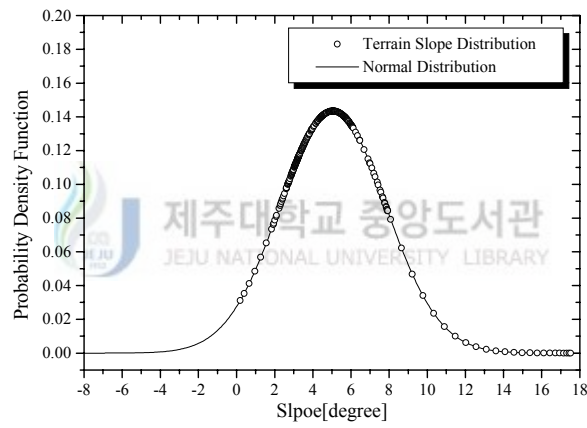
본 논문에서는 송신점과 수신점 사이의 지형 높이의 분포를 분석하여 실제 지형을 가상 평면으로 구성하였다. 수신점을 기준으로 송신점과 수신점 사이의 기울기 분포를 계산하고 회귀직선 방정식을 적용하여 가상 평면을 구성하였다. 이 가상 평면을 만드는 지형 기울기는 평탄한 대지에서의 직접파·반사파 모델을 변형하는 파라미터로 이용되었으며, 지형 기울기에 대한 계산 방법은 지형 데이터에서 송신점과 수신점의 지형 높이를 읽고 송신점과 수신점 사이의 지형 분포에 대한 지형 기울기 데이터를 구한다. 다음으로 지형 기울기 데이터에서 95.45%의 정규분포를 갖는 대표값을 구하여 수신 안테나의 높이와 송신점에서 수신점까지의 거리에 대한 회귀직선 방정식에 대입하였고, 이를 실제 지형에 적용하여 평탄한 대지로 변형하였다.

Fig. 24와 Fig. 25는 임의의 표본 지점에 대한 지형 기울기, 정규분포 곡선, 그리고 지형 프로파일을 표현한 것이다. Fig. 24c에 표현한 표본 A의 지형 분포에서 송신점과 수신점의 지형 높이는 각각 1,132m, 415m이고 거리는 8,150m이며 지면의 굴곡 상태는 평탄하였다. 표본 A의 지형 분포에 대한 지형 기울기 데이터는 20.4m의 거리 간격에 대하여 구하였고 이 데이터를 Fig. 24a에 나타내었다. 대부분의 지형 기울기는 2°에서 6° 사이에 분포하였으며 이를 백분율로 표현하였을 때 데이터의 분포는 정규분포를 가졌다. Fig. 24b는 데이터의 백분율에 대한 정규 확률밀도 함수를 나타낸 것이다. 지형 기울기 데이터의 평균과 표준편차는 5.1745°와 2.9167°이고, 정규 확률밀도 함수의 중앙값은 4.6754°이다. Fig. 24c에 나타낸 가상 평면의 기울기는 95.45%의 정규분포 구간에 있는 데이터에 대한 평균인 5.0532°를 가졌다.

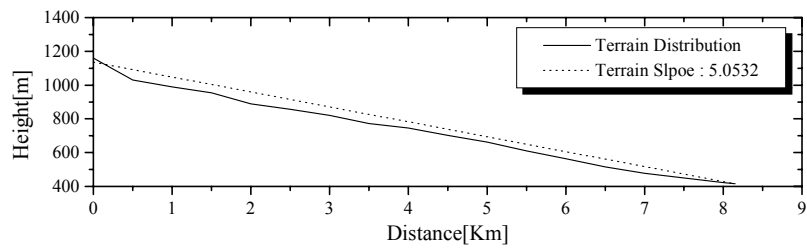
Fig. 25c에 표현한 표본 B의 지형 분포에서 송신점과 수신점의 지형 높이는 각각 1,132m, 61m이고 거리는 22,500m이며 지면의 굴곡 상태는 평탄하였다. 표본 B의 지형 분포에 대한 지형 기울기 데이터는 56.3m의 거리 간격에 대한 지형 높이의 기울기이며 대부분의 지형 기울기는 1°에서 4° 사이에 분포하였다. Fig. 25a는 지형 기울기를 나타낸 것으로 이를 백분율로 표현하였을 때 데이터의 분포는 정규분포를 가졌다. Fig. 25b는 데이터의 백분율에 대한 정규 확률밀도 함수를 나타낸 것이다. 지형 기울기 데이터의 평균과 표준편차는 각각 2.7838°와 2.7213°이고, 정규 확률밀도 함수의 중앙값은 2.2837°이다. Fig. 25c에 나타낸 가상 평면의 기울기는 95.45%의 정규분포 구간에 있는 데이터에 대한 평균인 2.7465°를 가졌다. Fig. 24c와 Fig. 25c에 표현한 실제 지형과 가상 평면은 좌표축의 눈금 비율이 같지 않기 때문에 가시적인 차이는 있는 것처럼 보이지만 실제 지형과 유사하며, 모든 표본지점에서 가상 평면은 실제 지형의 곡선에 매우 가깝게 접근하였다.



(a) Terrain slope data

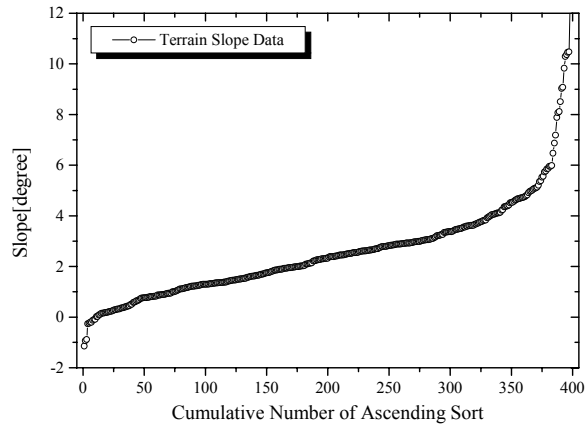


(b) Distribution of terrain slope

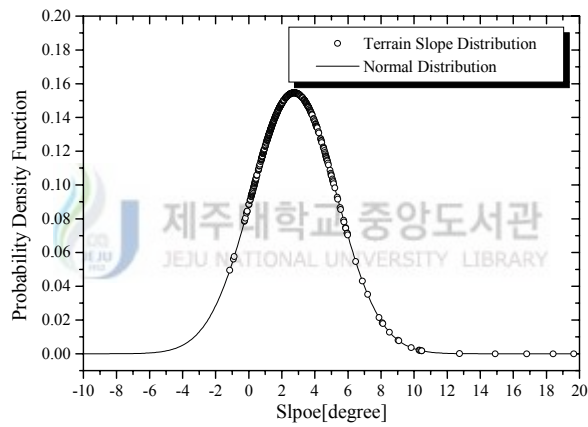


(c) Profile

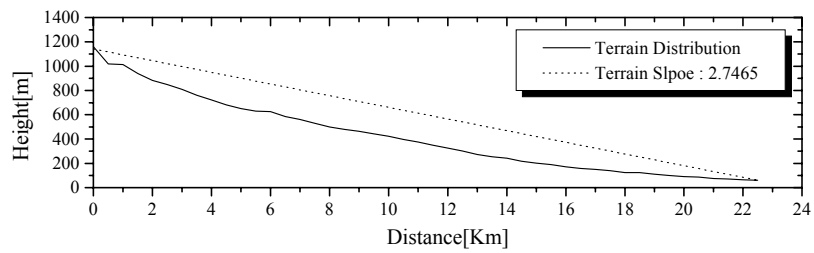
Fig. 24. Profile and terrain slope of sample A



(a) Terrain slope data



(b) Distribution of terrain slope



(c) Profile

Fig. 25. Profile and terrain slope of sample B

### 3) 대지면의 환경 특성

직접파·반사파 모델에서 반사계수의 변화에 영향을 미치는 또 다른 요인은 반사 대지면의 환경 특성이다. 대지면의 환경 특성은 개활 지역, 교외 지역, 도심 지역으로 구분하며 군엽에 대한 환경 구분도 이루어졌다(Lee, 1989).

본 논문에서는 대지면의 환경을 구분하기 위하여 위성사진으로 구분된 자연 환경을 전파 환경 조건에 적용하여 대지면의 환경을 구분하였다. 그리고 구분한 전파 환경을 데이터로 구성하여 대지면의 환경 특성으로 인한 영향을 분석하였다. 제주 전역의 대지면 환경 특성은 해안 지대에 인공 구조물이 분포되어 있는 주거지를 제외하고는 대부분 자연물이 분포하고 있으며 이 분포를 위성사진으로 확인하였다. 제주의 토지이용 분포를 분석한 제주도 위성사진(부록 I)에서 토지이용 분포를 분류한 결과는 용암 피복지, 적설지, 저목 수림대, 관목 수림대, 지지, 시가지, 그리고 전지이다(後藤 외, 1990).

식물의 수직 분포에서 일부 지대를 살펴보면 일반 평야와 같은 식물이 자라는 산록대, 줄기가 곧고 굵으며 위쪽에서 가지가 퍼지는 나무들이 무성한 교목대, 키 2m 안팎의 식물로 밑 등에서 가지가 많이 나는 나무들이 분포한 관목대, 그리고 고산의 꼭대기 부근이나 한지 등과 같이 나무가 자라지 못하고 초원이 형성된 초본대가 있다. 위성사진으로 분류한 저목 수림대는 교목대에 속하며 관목 수림대는 관목대에 속한다. 지지는 높이 60cm 이하의 풀이 분포된 영역이고 전지는 농경지인 밭이다. 그리고 제주 전지역의 토양은 화산 토양이기 때문에 용암 피복지의 분류는 토지이용 분류에 부적합하다. 그러므로 용암 피복지는 지지이거나 전지로 분류하였다.

본 논문에서는 위성사진으로 분류한 7가지의 토지이용 분포를 자연 지형에 대해 분류한 군엽 전파 환경(Lee, 1989)의 조건에 맞추어 산림 환경과 초지 환경으로 분류하였다. 시가지는 전파 환경의 분류에 있어서 인공 구조물의 형태에 따

른 분류에 포함되며 본 논문의 예측모델 적용 환경과 다르기 때문에 제외하였다. 산림 환경은 위성사진으로 분류한 저목 수림대와 관목 수림대이다. 그리고 초지 환경은 용암 피복지, 지지, 전지이다.

Fig. 26은 제주도 위성사진을 1,661×2,971의 크기로 구분하여 대지면의 환경을 도시한 것으로 전계강도 예측 알고리즘에서 대지면의 환경을 판별하기 위해 데이터로 구성되었다. 지형 데이터와 환경 특성 데이터는 송신 및 수신 위치, 지형 높이, 그리고 대지면의 환경 데이터를 제공하기 때문에 전파 특성 분석에 있어 효율성을 증대시킬 수 있다.

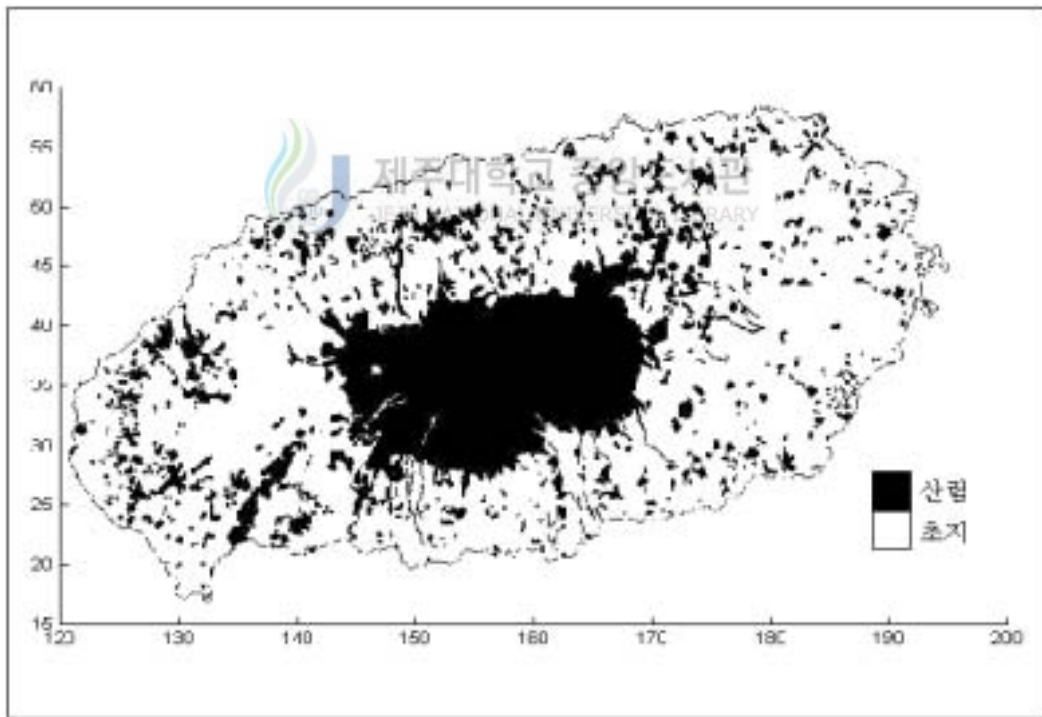


Fig. 26. Classes of land usage in Cheju

대지면의 환경 특성으로 인한 영향을 분석하기 위하여 표본 환경을 선정하여 전계강도를 측정하였고, 측정 데이터를 정량적으로 분석하여 반사계수를 구하였다. 반사계수 식은 매질의 도전율과 유전상수 그리고 입사각으로 이루어졌기 때문에 매질의 전기적 특성 값이 있어야 구할 수 있다. 대지면에 분포하는 나무나 풀 등의 전기적 특성을 구하는 것은 어렵기 때문에 본 논문에서는 반사계수에 의한 전계강도 분포와 전계강도의 측정 데이터를 분석하여 대지면의 환경 특성으로 인한 영향을 반사계수의 범위로 양적 평가하였다.

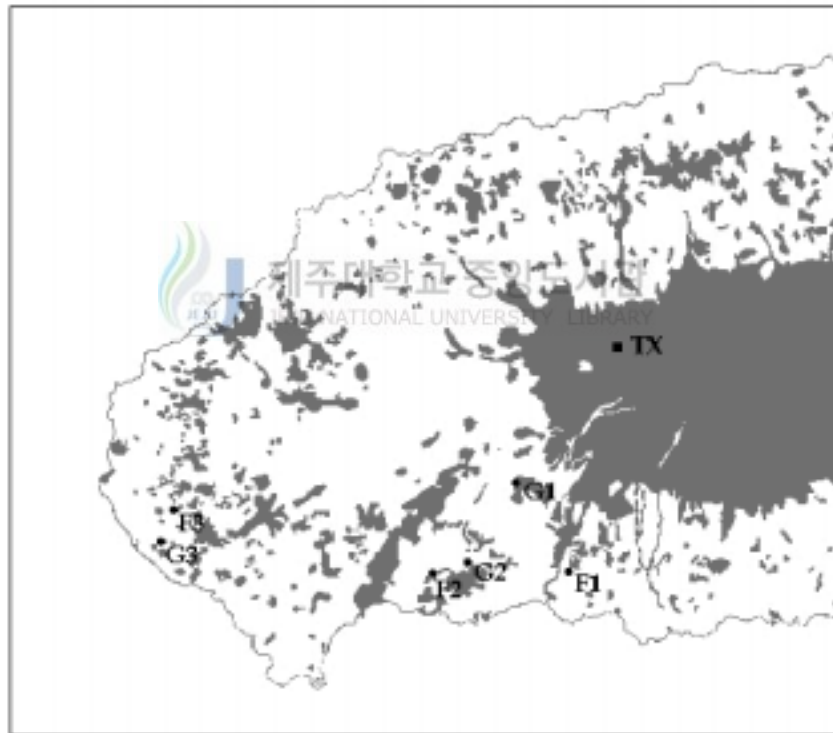


Fig. 27. Sample points for propagation environments

반사계수에 의한 예측 전계강도를 정량적으로 분석하기 위하여 반사점의 위치

는 초지 환경과 산림 환경에서 반사가 이루어지도록 표본 지점을 선정하였다. 또한 대지면의 환경 특성으로 인한 영향을 정확하게 알기 위하여 전파 경로상의 지형 분포는 굴곡이 매우 작고, 수신점은 대지면의 환경 특성에 따라 다양한 거리를 갖도록 선정하였으며, 이와 같은 송신점과 표본 지점을 Fig. 27에 표현하였다. Fig. 27에서 G1, G2, G3은 초지 환경에서 반사점을 갖는 표본 지점이고 F1, F2, F3은 산림 환경에서 반사가 되는 표본 지점이며, TX는 해발 1143m의 세오름에 위치한 송신국이며, 각 환경에 대한 표본 지점에서 전계강도를 측정하였다.

Fig. 28, Fig. 29, 그리고 Fig. 30에는 초지 환경의 표본 지점에서 측정한 전계강도 데이터를 나타내었고, 측정 데이터의 분포와 반사계수의 범위에 의한 예측 전계강도를 비교하였으며, 각 표본 환경에 대한 지형 프로파일을 나타내었다. 또한 산림 환경의 표본 지점에 대한 것은 Fig. 31, Fig. 32, Fig. 33에 나타내었다.

Fig. 28c의 지형 분포를 갖는 초지 환경의 표본 지점 G1은 해발 높이가 415m이고 송신 안테나로부터 수평 거리가 8,150m인 곳으로 송신점과 수신점 사이의 대지면 형태는 평탄하면서 약 5°의 경사를 이룬다. Fig. 28a에 보이는 측정 전계강도의 평균은 83.4dB $\mu$ W/m이고 표준편차는 0.31dB를 가졌다. 측정 데이터의 분포를 확인하기 위해 각각의 전계강도 값에 대한 돛수를 구하고 백분율을 계산하여 Fig. 28b에 원 기호로 나타내었으며, 백분율의 분포는 측정치의 평균과 표준편차를 정규분포 함수에 적용하여 구한 점선 정규분포 곡선에 접근하였다.

수신 전계강도는 대지면의 환경 특성에 의해 영향을 받기 때문에 예측 전계강도는 초지 환경과 산림 환경에 대한 반사계수를 정량적으로 분석하여 구하였다. 수직편과 반사계수를 나타내는 식(32)에서 반사면의 도전율과 유전상수의 범위를



각각 300개의 구간으로 나누어 이에 대응하는 반사계수를 구하였다. 이때 적용한 유전상수의 범위는 4에서 30 사이의 값을 갖고 도전율은 0.005S/m에서 0.02S/m의 범위를 갖는다. 그리고 이 반사계수를 식(53)의 예측 모델에 대입하여 반사계수에 의한 예측 전계강도를 구하였다.

반사계수를 적용하여 구한 예측 전계강도는 수직편파의 반사계수 특성 때문에 매우 넓은 범위에 값이 분포하였으며 최대치와 최소치의 차이는 10dB 정도이다. 초지 환경과 산림 환경에 적합한 반사계수를 구하기 위해 측정치와 비교하여 일정 값의 편차를 갖는 전계강도 계산 값을 선택하였고, 이것으로부터 각 표본 지점에 대한 반사계수의 범위를 구하였다. 동일 환경에 대한 반사계수는 각 표본 지점들의 반사계수 범위를 서로 비교하여 공통적인 범위를 갖는 반사계수의 교집합을 구하였다. 동일한 환경에서 각 표본 지점에 대한 반사계수의 교집합은 전계강도의 계산 값과 측정치간의 오차를 3dB로 가정하였을 때 가장 적합하였으며, 3dB보다 작은 값을 오차로 선정하였을 때는 부분 교집합이 발생치 않는 경우가 있어 동일 환경의 반사계수를 구하는데 적합치 않았다.

Fig. 28b에 나타난 실선 정규분포 곡선은 초지 환경에 대한 반사계수를 적용하여 구한 예측 전계강도의 분포이다. 대지면의 환경 특성을 나타낸 반사계수를 적용한 예측 데이터는 평균이  $80.6\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 이고 표준편차가 0.36dB를 갖는 분포를 보였다. 예측치 평균과 측정치 평균간의 오차는 2.8dB가 발생하였고, 수신 전계강도는  $77.6\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 에서  $83.6\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 예측 범위를 가져 측정 평균치를 포함하였다.

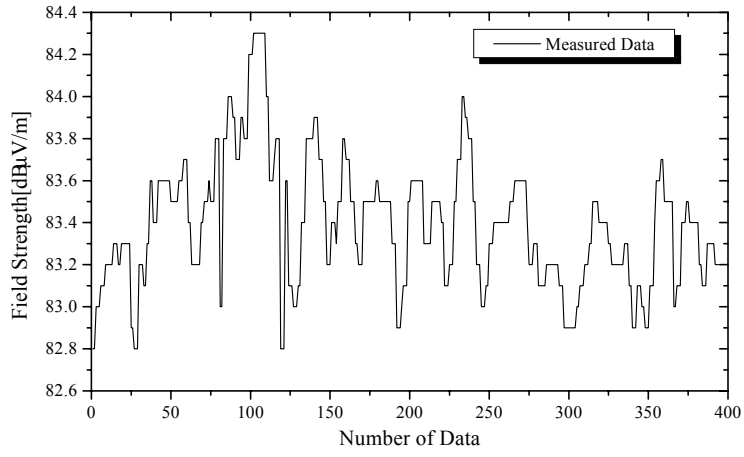
Fig. 29에는 초지 환경의 표본 지점 G2에 대한 결과를 나타내었다. 표본 지점 G2의 지형 분포는 Fig. 29c의 프로파일에서 알 수 있듯이  $4.2^\circ$ 의 경사를 가졌고 평탄한 대지면의 형태를 보였다. 그리고 수평 거리는 13,100m이고 해발 높이는 175m이다. Fig. 29a에 표현한 측정 전계강도 데이터는 평균이  $77.9\text{dB}\mu\text{W}$

/m이고 표준편차가 0.59dB이다. 측정 데이터의 분포는 전계강도 값에 대한 백분율을 계산하여 원 기호로 Fig. 29b에 표현하였으며, 측정 전계강도의 백분율 분포는 점선 정규분포에 접근하였다.

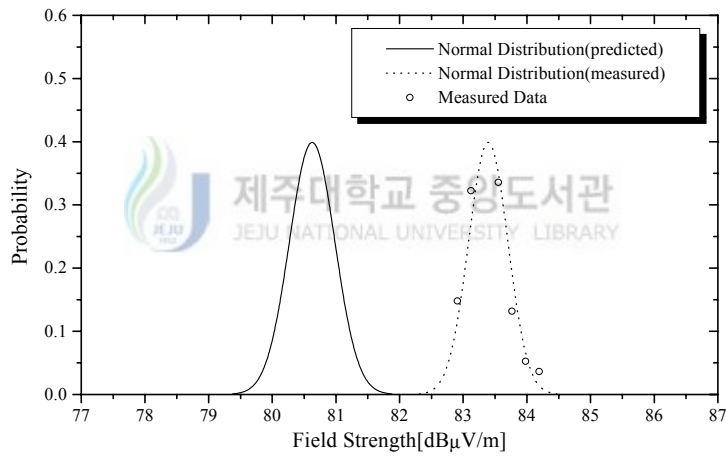
Fig. 29b에 나타낸 실선 정규분포 곡선은 예측치의 평균이  $76.4\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 이고 표준편차가 0.38dB일 때의 분포이다. 예측치와 측정치간의 오차는 1.5dB가 발생하였고 수신 전계강도의 예측 범위는  $73.4\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 에서  $79.4\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 를 보여  $77.8\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 의 측정 평균치를 포함하였다.

Fig. 30의 표본 지점 G3은 Fig. 27에서와 같이 표본 지점 G1과 G2의 위치보다 송신점에서 먼 곳에 위치하여 3°의 경사를 이루며, 25,900m의 수평 거리와 20m의 해발 높이를 갖는다. 측정 데이터의 평균은  $72.9\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 이고 표준편차는 0.18dB이며, 전계강도 분포를 Fig. 30a에 나타내었다. 각각의 전계강도 값에 대한 뒳수를 구하고 백분율을 계산하여 Fig. 30b에 나타내었고, 백분율 분포의 결과는 측정치의 평균과 표준편차를 정규분포 함수에 적용하여 구한 점선 정규분포 곡선에 접근하였다.

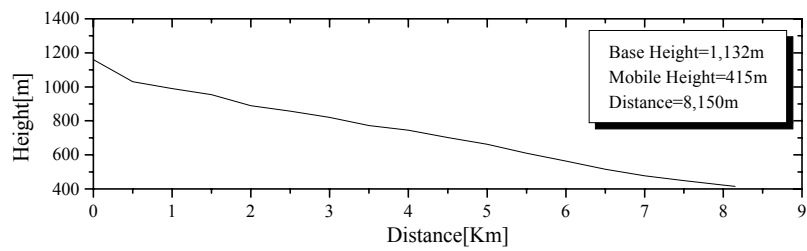
Fig. 30b에 표현한 실선 정규분포 곡선은 예측치의 평균이  $70.6\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 이고 표준편차가 0.36dB를 갖는 정규분포를 보였다. 예측치와 측정치간의 오차는 1dB가 발생하였고, 측정치를 포함하는  $77.6\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 에서  $83.6\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 의 수신 전계강도의 예측 범위를 가졌다.



(a) Measured data

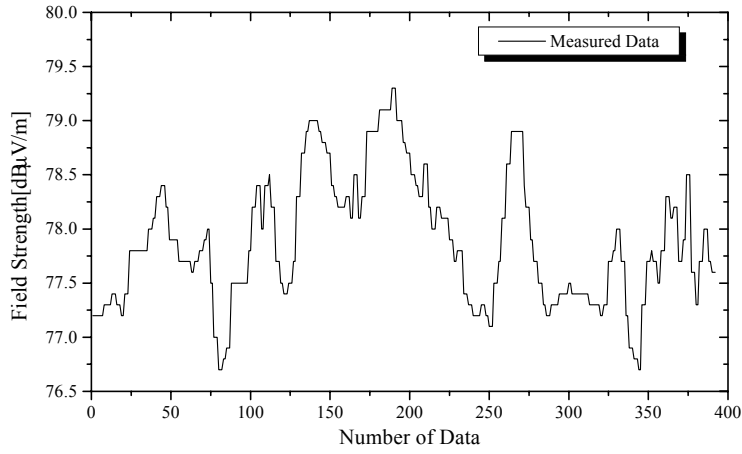


(b) Comparison with normal distributions

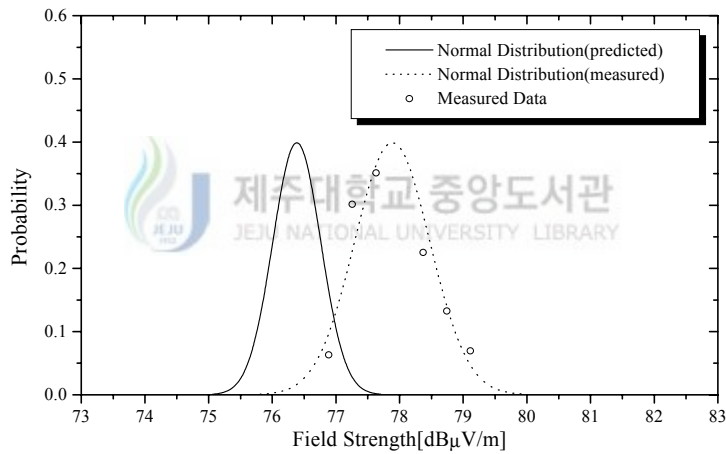


(c) Profile

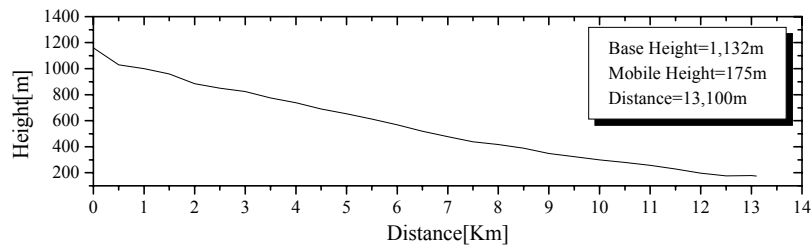
Fig. 28. Profile and field strength for sample G1



(a) Measured data

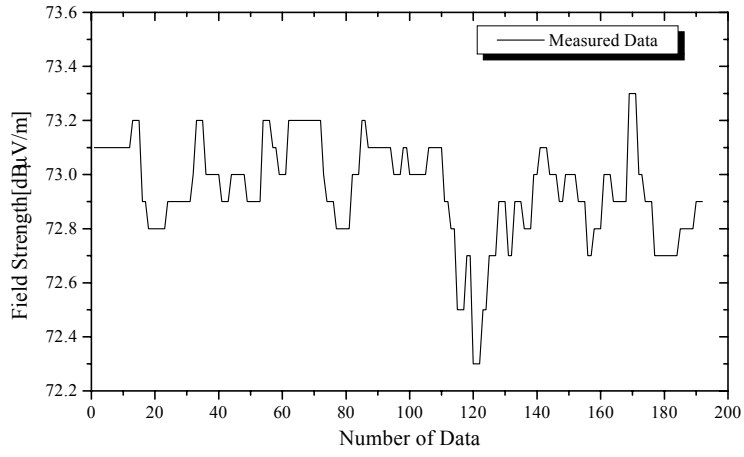


(b) Comparison with normal distributions

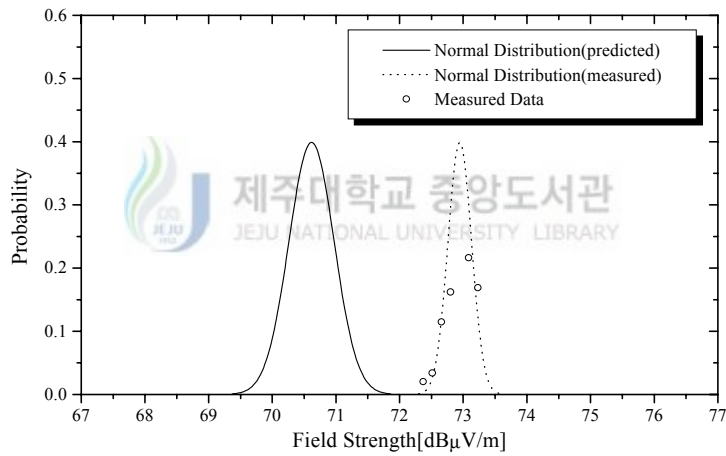


(c) Profile

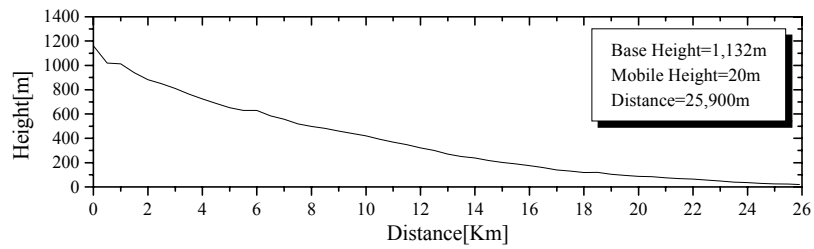
Fig. 29. Profile and field strength for sample G2



(a) Measured data



(b) Comparison with normal distributions



(c) Profile

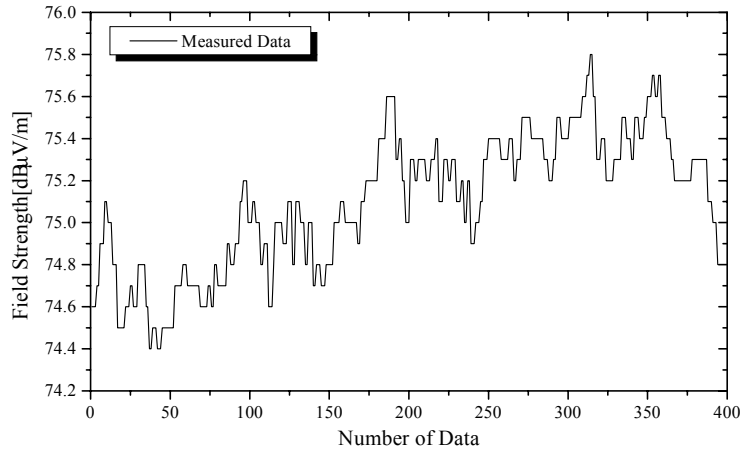
Fig. 30. Profile and field strength for sample G3

반사점이 산림 환경에 놓여 있는 표본 지점 F1의 지형 분포를 Fig. 31c에 표현하였다. 표본 지점 F1의 수평 거리는 11,550m이고 해발 높이는 120m이다. 그리고 대지면의 형태는 표본 지점 G1과 동일한 경사도를 가지면서 평탄하였다. Fig. 31a의 분포를 갖는 측정치의 평균은  $75.1\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 이고, 표준편차는  $0.32\text{dB}$ 이다. Fig. 31b에 원 기호로 표현한 측정 데이터의 백분율 분포는 점선 정규분포에 접근하였다.

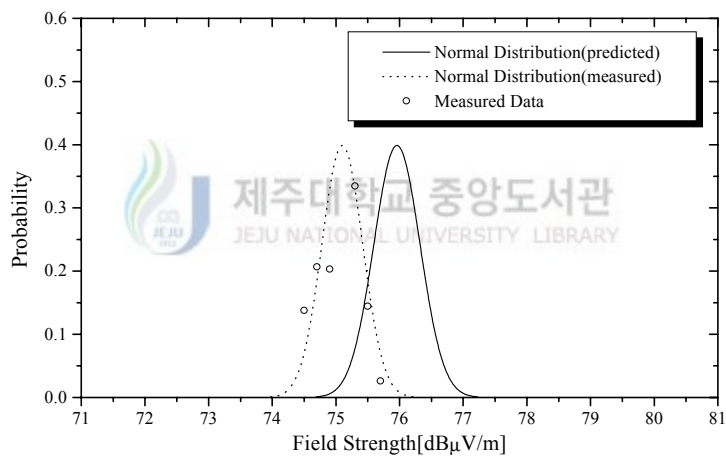
Fig. 31b에 나타낸 실선 정규분포 곡선은 예측 전계강도의 분포이다. 대지면의 환경 특성을 나타낸 반사계수를 적용하였기 때문에 예측 데이터는 평균이  $75.9\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 이고 표준편차가  $0.36\text{dB}$ 를 갖는 분포를 보였다. 예측치와 측정치간의 오차는  $0.8\text{dB}$ 가 발생하였고,  $72.9\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 에서  $78.9\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 수신 전계강도의 예측 범위를 가져  $75.1\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 측정치를 포함하였다.

Fig. 32는 표본 지점 F2에 대한 결과이다. Fig. 32c의 지형 분포를 갖는 표본 지점 F2에 대한 대지면의 형태는  $4^\circ$ 의 경사도를 가지면서 평탄하였다. 그리고 수평 거리는 15,000m이고 해발 높이는 100m이다. Fig. 32a에 표현한 전계강도 데이터는  $71.4\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 평균과  $0.39\text{dB}$ 의 표준편차를 가졌고 이 값들을 Fig. 32b에 나타낸 점선 정규분포 곡선을 구하는데 적용하였다. 측정 데이터의 확률 분포는 전계강도의 숫수에 대한 백분율을 구하여 원 기호를 사용하여 표현하였으며 점선 정규분포에 접근하였다.

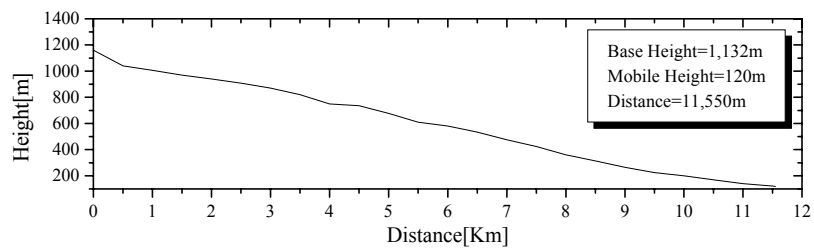
Fig. 32b에 실선으로 나타낸 예측 데이터의 정규분포 곡선은 산림 환경의 특성을 갖는 반사계수에 의해 평균이  $73.2\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 이고 표준편차가  $0.44\text{dB}$ 를 갖는 분포를 보였다. 또한  $70.2\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 에서  $76.2\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 수신 전계강도 예측 범위를 가져  $71.4\text{dB}\mu\text{W}/\text{m}$ 의 측정 평균치를 포함하였다.



(a) Measured data

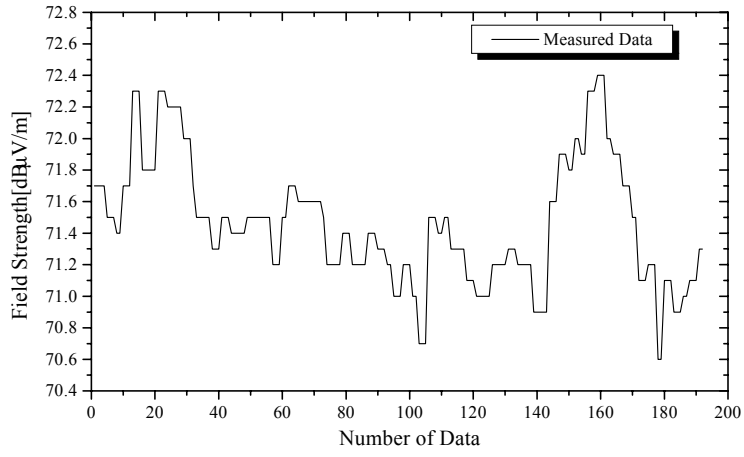


(b) Comparison with normal distributions

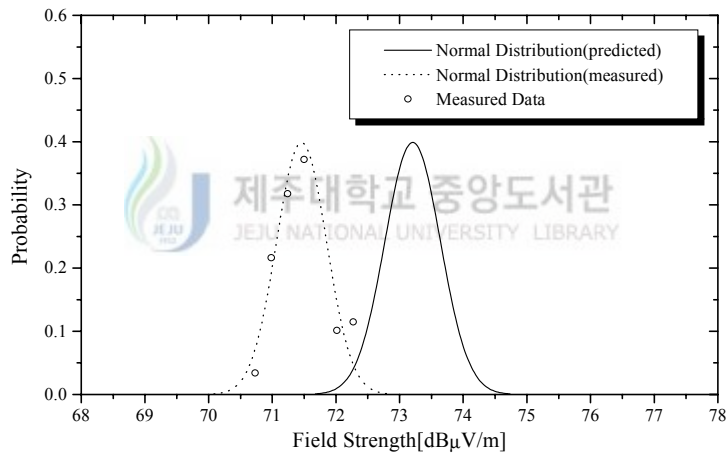


(c) Profile

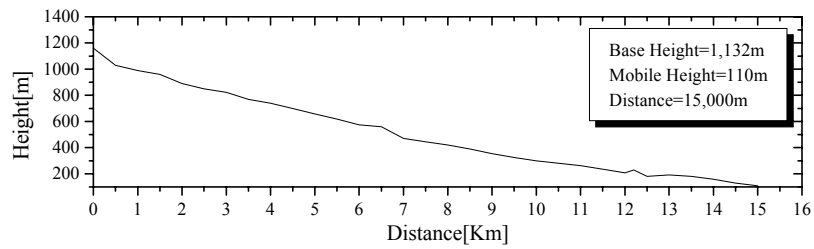
Fig. 31. Profile and field strength for sample F1



(a) Measured data



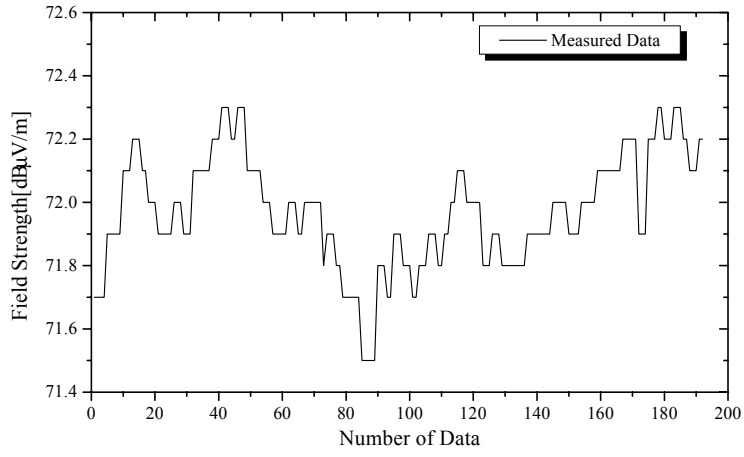
(b) Comparison with normal distributions



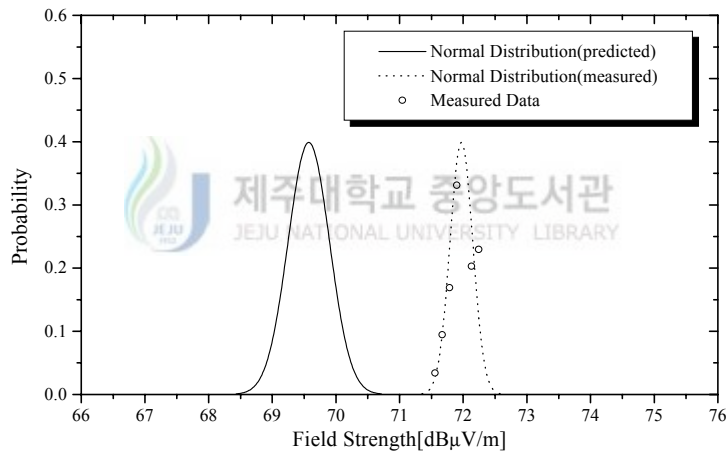
(c) Profile

Fig. 32. Profile and field strength for sample F2

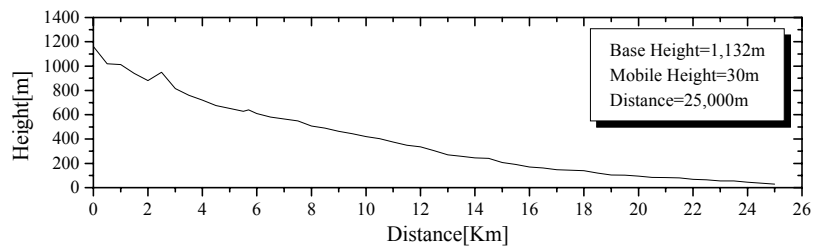




(a) Measured data



(b) Comparison with normal distributions



(c) Profile

Fig. 33. Profile and field strength for sample F3

Fig. 33의 표본 지점 F3에 대한 대지면의 형태는 2.5°의 경사를 이루면서 30m의 해발 높이와 25,000m의 수평 거리를 갖는다. 이에 대한 프로파일은 Fig. 33c에 표현하였다. Fig. 33a의 전계강도 분포를 갖는 표본 지점 F3에서 평균은 71.9dB $\mu$ V/m이고 표준편차는 0.18dB이다.

Fig. 33b에 실선으로 표현한 예측 데이터의 정규분포 곡선은 산림 환경의 반사계수에 의해 평균이 69.6dB $\mu$ V/m이고 표준편차가 0.32dB를 갖는 분포를 보였다. 또한 66.6dB $\mu$ V/m에서 72.6dB $\mu$ V/m의 수신 전계강도 예측 범위를 가져 측정 평균치를 포함하였다.

Fig. 28에서 Fig. 33에 나타낸 것과 같이 초지 환경과 산림 환경에 대한 표본 지점에서 예측 전계강도와 측정 전계강도의 오차는 3dB 이내에 분포하여 반사계수에 의한 예측치 분포의 타당성을 확인할 수 있었다. 초지 환경에서 반사계수의 크기가 0.35에서 0.45이고 위상이 -176°일 때 전계강도는 예측 범위 안에 분포하였고, 산림 환경에서는 반사계수의 크기가 0.45에서 0.65이고 위상이 -171°일 때 예측 범위 안에 분포하였다. 초지 환경과 산림 환경에 대한 반사계수를 Table 1의 전기적 특성에 따른 반사계수와 비교해 볼 때 각각 건조한 대지와 평균 대지의 특성과 유사하였다. 또한 초지 환경과 산림 환경에 대한 표본 지점에서 입사각은 송신 및 수신 안테나의 높이와 수평 거리에 의해 7°이내의 값을 가졌다. 따라서 입사각에 의한 반사계수의 크기는 0.32 이상이고 위상은 -180°와 -170° 사이에 분포하기 때문에 측정 데이터로 구한 반사계수는 이론적인 반사계수의 범위를 벗어나지 않았으며 대지면의 환경 특성에 의한 영향을 나타내는데 적합하였다.

#### 4) 매질의 전기적 특성 추출

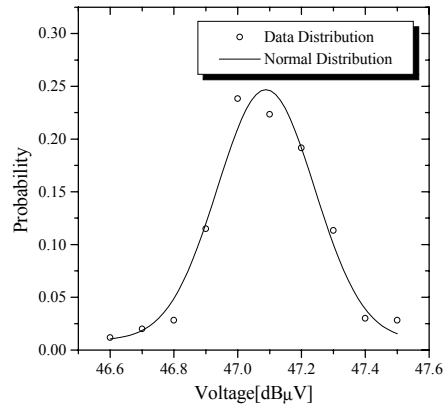
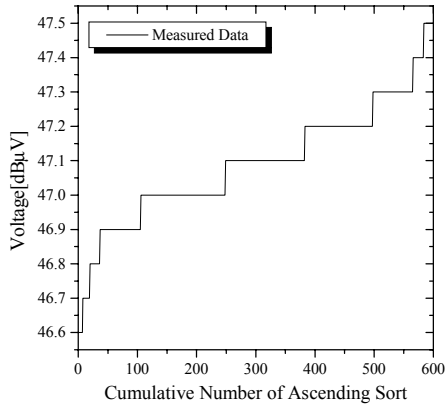
실제 전파 환경에서 반사계수는 반사가 일어나는 매질의 복소 유전상수에 따라 달라지며 이에 따라 수신 전계강도 또한 변동하게 된다. 가시거리 전파 환경에 대한 반사 현상을 분석하기 위해서는 매질의 전기적 특성이 필요하다. 일반적인 대지의 전기적 특성은 Table 1과 같이 알려져 있지만 모든 대지에 대해 적용할 수 없기 때문에 대상 매질에 대해 측정을 통하여 반사계수를 구하고 있다 (Landron 등, 1996). 이 측정 방법은 지향성이 매우 예리한 안테나를 사용하여 직접파와 반사파 성분에 대한 전계강도의 측정 데이터와 이론 데이터를 분석하여 반사계수를 구한다. 본 논문에서는 반파장 다이폴 안테나를 사용하여 매질의 전기적 특성을 추출하였다. 측정에 사용된 반파장 다이폴 안테나의 지향 특성은 수평면에 대해서 전방향 특성을 갖고 수직면에 대해서는  $70^\circ$ 의 반전력 빔폭을 갖는다. 측정 방법은 다이폴 안테나의 수직편파 및 수평편파에 대한 전계강도를 얻기 위하여 개활 전파 환경에서 송신 다이폴 안테나의 수직면 및 수평면에 대한 복사 전자파 에너지를 수신 다이폴 안테나의 수직면 및 수평면에 의해 전계강도를 수신하는 것이다. 또한 여러 주파수에 대하여 동일한 매질에서 같은 방법으로 측정한다. 정확한 측정값을 얻기 위해 동일한 송신 전력 및 전파 환경에 대하여 3회 반복 측정을 하였다. 송신 전력에 대한 반복 측정은 동일한 전력으로 주파수에 대한 전계강도를 구하였고 전파 환경에 대한 반복 측정은 동일한 안테나 높이와 수평 거리를 갖는 위치 변경으로 전계강도를 구하였으며 1회 측정에서 전계강도 데이터의 수는 600개이다. 대지면의 형태는 석분(stone powder) 대지, 아스팔트(asphalt) 대지, 그리고 잔디 대지이고 측정 환경에 적용한 파라미터는 Table 3과 같다. 그리고 측정 데이터로부터 통계 처리하여 매질의 전기적 특성을 구하였다.

Table 3. Specification of measuring system for obtaining electrical characteristics of ground

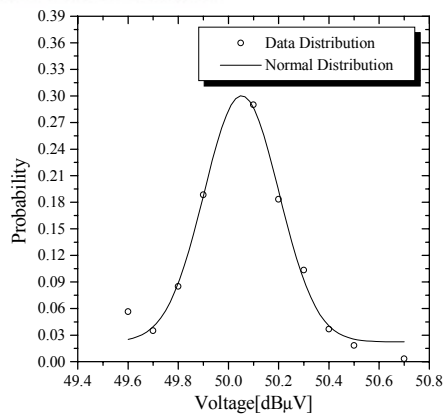
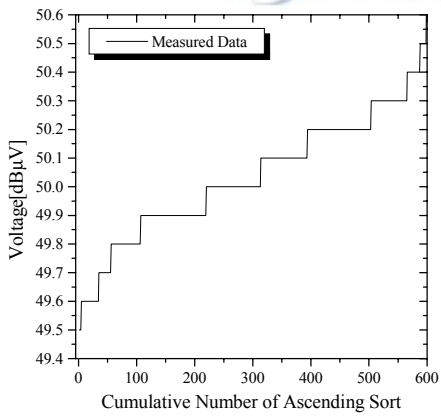
Antenna Type	$\lambda/2$ Dipole		
Antenna Height	1.5m		
Distance between Antennas	20m		
Terminal Power	10dBm	0dBm	-10dBm
Frequency	1.9GHz	2.2GHz	2.5GHz

Fig. 34와 Fig. 35는 송신 전력이 0dBm이고 대지 상태가 아스팔트일 때 편파 특성에 대한 측정 결과이다. Fig. 34는 안테나의 편파 특성이 수직편파일 때 1.9GHz, 2.2GHz, 그리고 2.5GHz의 주파수에 대한 측정 데이터의 분포와 백분율 분포를 나타낸 것이다. 측정 데이터의 분포는 측정 데이터를 오름차순 정렬하여 누적 도수에 대한 수신 전계강도로 나타내었고, 백분율 분포는 데이터의 크기를 10개의 계급 구간으로 구분하고 각 계급 구간에 해당하는 도수를 구한 후 총 도수에 대한 백분율을 적용한 결과이다. 그리고 계급값과 도수의 백분율을 정규 확률밀도 함수에 적용하여 정규분포의 곡선을 구하였다. 정규분포의 곡선과 백분율 분포를 비교할 때 측정 데이터의 분포는 정규분포에 접근하였다.

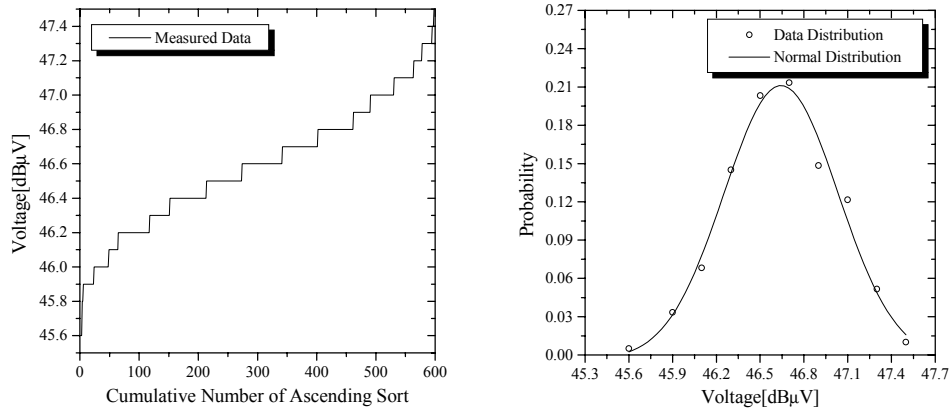
Fig. 35는 수평편파일 때 3개의 주파수에 대한 측정 데이터의 분포와 백분율 분포를 나타낸 것이다. 수직편파에서와 동일한 방법으로 백분율 분포를 구하여 표현하였고 정규분포 곡선과 백분율 분포를 비교할 때 측정 데이터의 분포는 정규분포에 접근하였기 때문에 측정 데이터의 표본 평균은 정규분포의 중앙값을 적용하여 구하였다.



(a) 1.9GHz

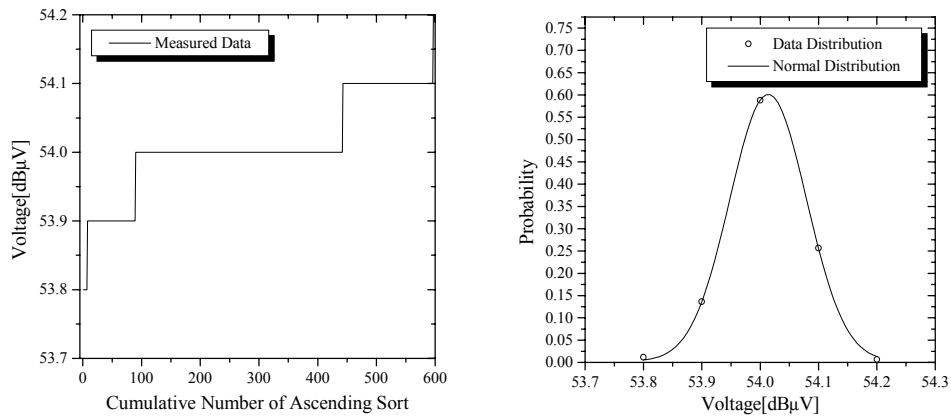


(b) 2.2GHz

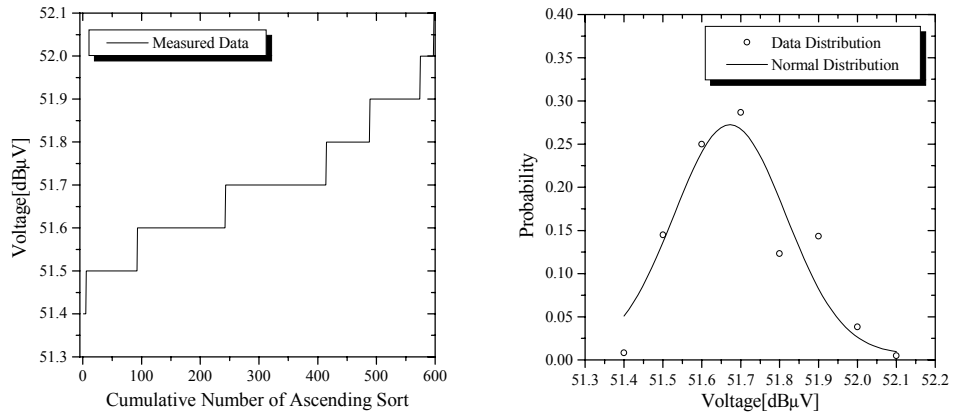


(c) 2.5GHz

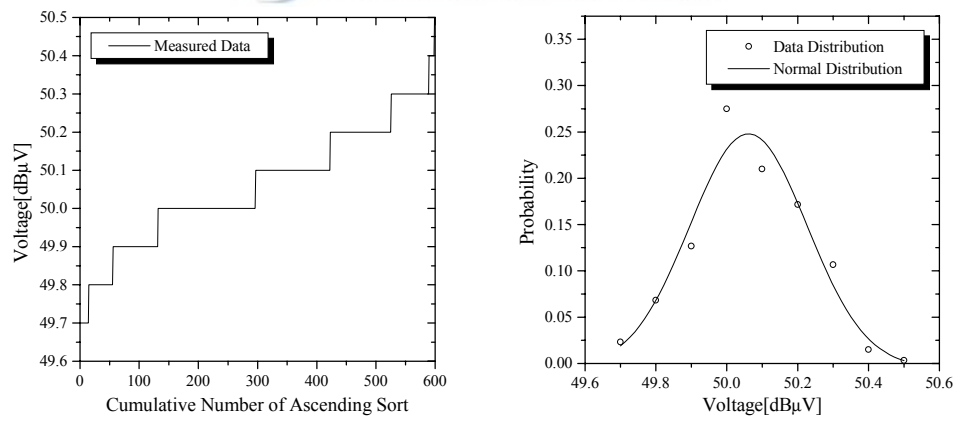
Fig. 34. Measured data distribution for the case of vertical polarization



(a) 1.9GHz



(b) 2.2GHz



(c) 2.5GHz

Fig. 35. Measured data distribution for the case of horizontal polarization

Table 4, Table 5, 그리고 Table 6은 각각 석분 대지, 아스팔트 대지, 그리고 잔디 대지에서 3회 반복 측정한 데이터의 정규분포 결과를 나타낸 것이다. Table 4에서 굵은 실선으로 구분된 부분의 값들은 송신 전력이 각각 10dBm, 0dBm, 그리고 -10dBm일 때의 정규분포의 중앙값과 표준편차이고, 수직편파와 수평편파에 대한 측정 데이터는 각각의 주파수에 대하여 송신 전력에 따른 결과를 구분하여 나타내었다. 그리고 각각의 주파수 부분에 나타낸 3개의 값은 3회 반복한 측정 데이터의 값이다. 각각의 주파수에 대한 중앙값간의 오차는 평균 2dB의 값을 가졌고 주파수가 2.4GHz일 때 중앙값간의 오차뿐만 아니라 표준편차가 상대적으로 작은 값을 가졌다. 또한 측정 데이터는 10dB의 간격을 갖는 송신 전력에 대한 값을 구하였기 때문에 수신 전계강도의 중앙값도 10dB의 차이를 보여 측정의 정확성을 확인할 수 있었다.

Table 5와 Table 6에서 측정 데이터에 대한 정규분포 결과는 Table 4와 같은 방법으로 송신 전력, 편파 특성, 그리고 주파수로 구분하여 중앙값과 표준편차를 나타내었다. 각각의 주파수에 대한 3개의 중앙값간의 오차는 평균 3dB의 값을 보였다.

석분, 아스팔트, 잔디 대지에 대한 전기적 특성을 추출하기 위해서는 편파 특성에 대한 수신 전계강도가 필요하므로 측정을 통하여 Table 4, Table 5, 그리고 Table 6에 표현된 중앙값을 구하였다. 그리고 Table 3의 파라미터 값과 수신 전계강도를 식(42)의 반사계수에 대한 원의 방정식에 적용하였다.



Table 4. Average and standard deviation of measured data for stone powder by three frequencies

Frequency(GHz)		1.9			2.2			2.5		
Power & Polarization		10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	58.4	59.6	57.9	59.5	60.9	59.4	56.6	59.6	58.4
	Standard Deviation	0.18	0.16	0.17	0.15	0.14	0.21	0.33	0.15	0.18
Power & Polarization		10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	60.0	60.8	61.0	60.0	61.0	59.0	56.4	61.2	59.7
	Standard Deviation	0.03	0.16	0.09	0.13	0.15	0.11	0.22	0.19	0.14
Power & Polarization		0dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	48.7	50.0	48.4	49.9	51.0	49.6	47.4	49.5	48.8
	Standard Deviation	0.14	0.19	0.09	0.13	0.21	0.16	0.45	0.20	0.14
Power & Polarization		0dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	50.5	51.3	51.4	50.3	51.3	49.2	46.7	51.8	49.6
	Standard Deviation	0.13	0.08	0.11	0.13	0.25	0.09	0.20	0.14	0.15
Power & Polarization		-10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	38.6	40.0	38.3	39.9	40.8	39.2	37.3	40.1	38.8
	Standard Deviation	0.13	0.14	0.14	0.14	0.19	0.17	0.38	0.19	0.21
Power & Polarization		-10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	40.7	41.5	41.7	40.5	41.3	39.1	36.7	41.5	39.5
	Standard Deviation	0.10	0.09	0.09	0.17	0.10	0.14	0.30	0.05	0.10

Table 5. Average and standard deviation of measured data for asphalt by three frequencies

Frequency(GHz)		1.9			2.2			2.5		
Power & Polarization		10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	58.6	59.6	58.7	60.4	61.3	59.4	59.7	57.9	58.6
	Standard Deviation	0.17	0.34	0.53	0.22	0.21	0.41	0.46	0.42	0.39
Power & Polarization		10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	56.8	64.1	61.4	58.4	63.7	61.5	56.5	59.7	56.8
	Standard Deviation	0.29	0.24	0.60	0.49	0.10	0.35	0.53	0.23	0.69
Power & Polarization		0dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	47.1	49.8	48.5	48.8	51.6	50.0	46.6	48.0	48.5
	Standard Deviation	0.34	0.51	0.35	0.46	0.13	0.43	0.72	0.46	0.64
Power & Polarization		0dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	48.6	54.0	51.7	50.8	53.4	51.6	50.0	49.9	47.4
	Standard Deviation	0.18	0.13	0.32	0.18	0.14	0.28	0.31	0.23	0.61
Power & Polarization		-10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	37.3	40.1	38.3	39.1	41.5	39.7	36.7	38.2	38.8
	Standard Deviation	0.26	0.43	0.54	0.23	0.21	0.31	0.48	0.25	0.68
Power & Polarization		-10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	38.8	44.3	41.4	40.8	43.5	41.6	40.2	40.1	37.4
	Standard Deviation	0.24	0.14	0.37	0.21	0.15	0.63	0.37	0.26	0.43

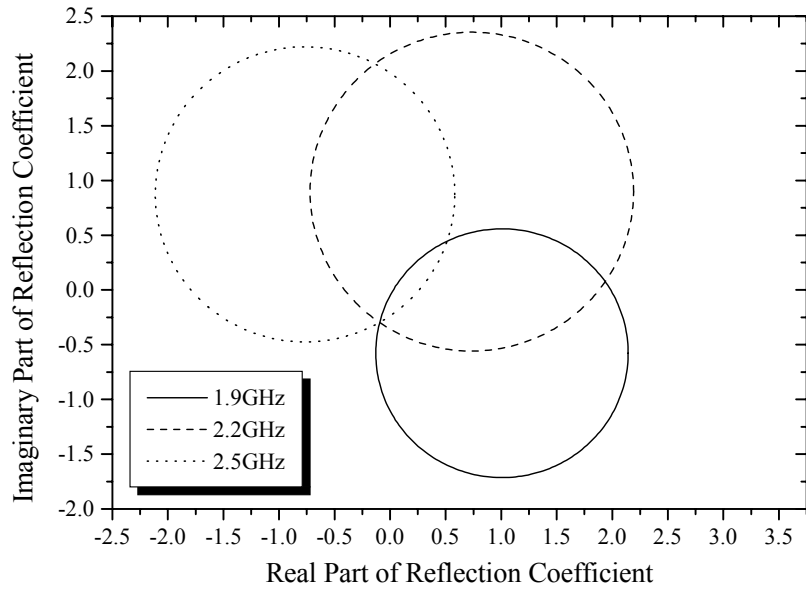
Table 6. Average and standard deviation of measured data for turf by three frequencies

Frequency(GHz)		1.9			2.2			2.5		
Power & Polarization		10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	60.7	60.3	55.7	61.8	60.9	60.3	61.1	59.3	58.0
	Standard Deviation	0.20	0.27	0.30	0.28	0.21	0.20	0.20	0.26	0.20
Power & Polarization		10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	59.1	62.6	57.3	63.8	61.5	59.9	64.6	61.2	58.0
	Standard Deviation	0.21	0.36	0.27	0.19	0.19	0.17	0.17	0.24	0.22
Power & Polarization		0dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	51.1	50.5	46.0	52.2	52.1	50.2	51.3	49.7	48.3
	Standard Deviation	0.20	0.27	0.30	0.28	0.19	0.20	0.20	0.26	0.20
Power & Polarization		0dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	50.9	52.7	47.4	53.5	51.9	50.5	54.6	51.8	48.5
	Standard Deviation	0.21	0.37	0.27	0.19	0.19	0.17	0.17	0.24	0.22
Power & Polarization		-10dBm & Vertical								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	40.9	40.5	35.8	41.7	41.7	40.2	41.0	39.7	38.5
	Standard Deviation	0.20	0.17	0.30	0.19	0.20	0.16	0.36	0.46	0.24
Power & Polarization		-10dBm & Horizontal								
Factor (dB $\mu$ V)	Average	41.1	41.9	37.4	43.6	42.0	40.1	44.8	41.8	38.3
	Standard Deviation	0.34	0.17	0.25	0.14	0.16	0.24	0.26	0.25	0.29

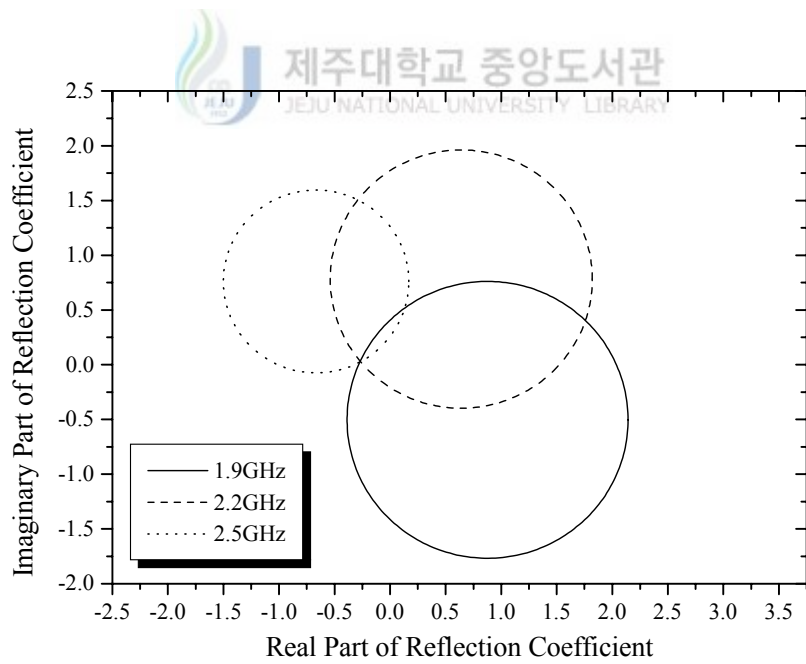
Fig. 36, Fig. 37, 그리고 Fig. 38은 각각 Table 4, Table 5, Table 6에 나타난 중앙값을 식(42)의 원의 방정식에 적용하여 구한 반사계수의 값을 나타낸 것이다. 임의의 한 입사여각에서 수직편파와 수평편파에 대한 반사계수는 여러 주파수의 원이 교차하는 좌표의 값이다. 교차점의 좌표는 반사계수의 위상 특성에 의해 수직편파인 경우 3사분면에 놓이게 되며 수평편파에서는 2사분면에 위치한다. 측정 결과로부터 얻은 교차점의 좌표는 수직편파의 경우 3사분면에, 수평편파인 경우 2사분면에 위치하여 이론을 적용할 수 있었다.

측정 방법에서 두 환경에 적용된 송신 및 수신 안테나의 높이와 수평 거리를 같게 하였기 때문에 수직편파와 수평편파에 대한 원의 중심은 Fig. 36, Fig. 37, 그리고 Fig. 38에서 동일한 좌표를 가졌고, 동일한 송신 전력과 주파수일지라도 편파 특성에 따라 수신 전계강도가 서로 다르기 때문에 원의 반경은 서로 다른 값을 가졌다. 그리고 주파수가 같고 동일한 편파 특성인 경우 송신 전력을 달리하여도 원의 반경은 같기 때문에 송신 전력과 주파수를 달리하여 반복 측정한 결과를 이용하여 반경에 대한 보정을 하였다. Fig. 36a의 석분 대지에서 교차 좌표는  $(-0.1037, -0.3021)$ 이고, Fig. 36b에서 교차 좌표는  $(-0.2651, 0.0309)$ 이다. Fig. 37a의 아스팔트 대지에서 교차 좌표는  $(-0.0756, -0.1380)$ 이고 Fig. 37b에서는  $(-0.1755, 0.0447)$ 이다. 그리고 잔디 대지에 대한 교차 좌표는 수직편파인 경우  $(-0.3016, -0.3934)$ 이고 수평편파인 경우는  $(-0.2070, 0.0381)$ 이다.

식(39)의 복소 유전상수에서 허수부는 도전율과 파장의 곱으로 이루어졌기 때문에 주파수가 다른 원들의 교차점의 좌표는 임의의 한 원에서 적용된 주파수의 수보다 하나 작은 수만큼 나타난다. 그렇지만 한 원에 위치한 좌표간의 차이는 Fig. 8과 Fig. 10, 그리고 Fig. 12에서 관찰되듯이 매우 작으며 3개 이상의 주파수를 사용하면 보정을 할 수 있다.

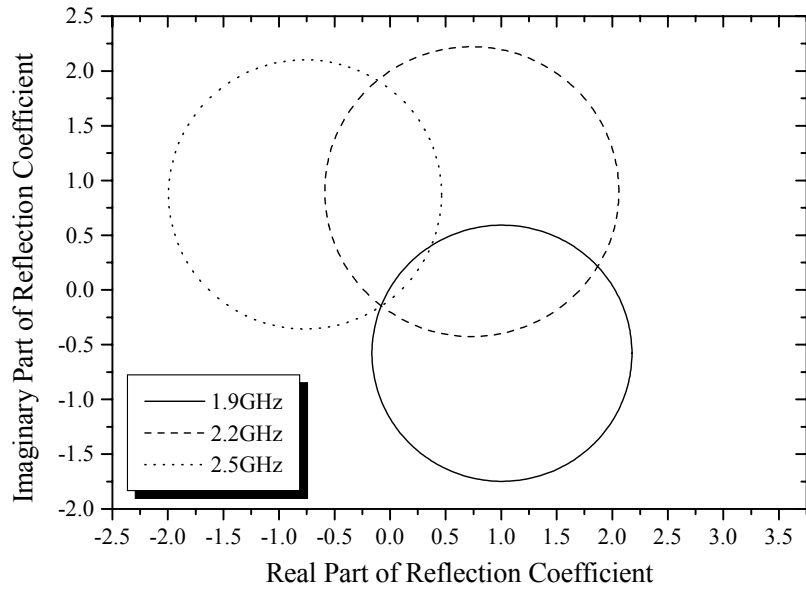


(a) Vertical Polarization

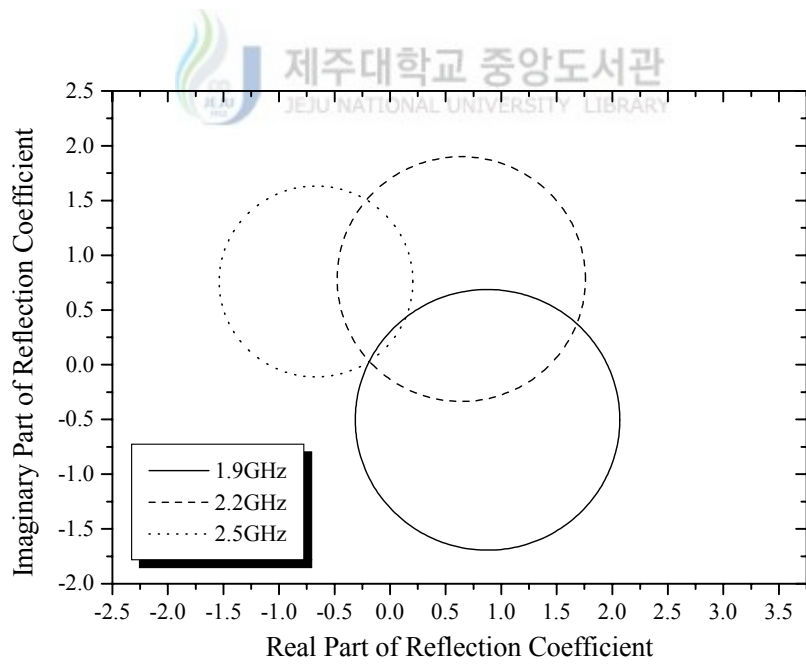


(b) Horizontal Polarization

Fig. 36. Circles of reflection coefficients for stone powder

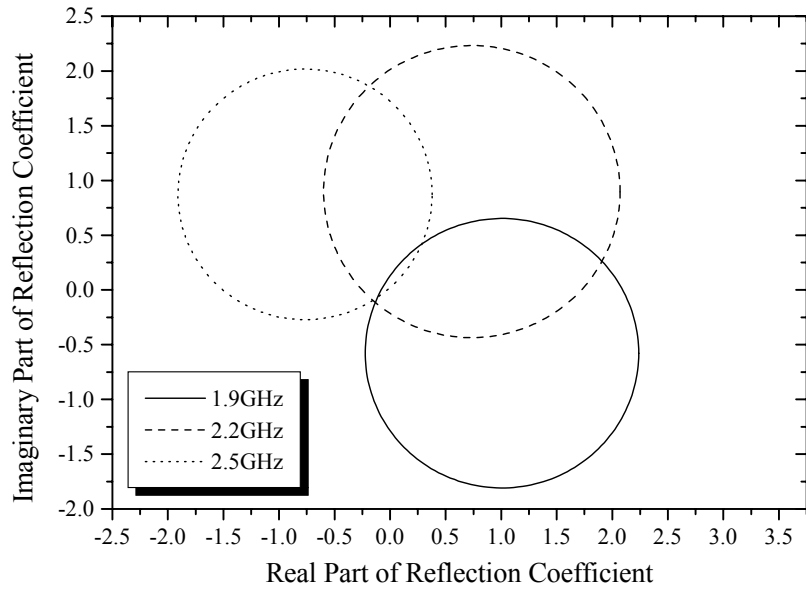


(a) Vertical Polarization

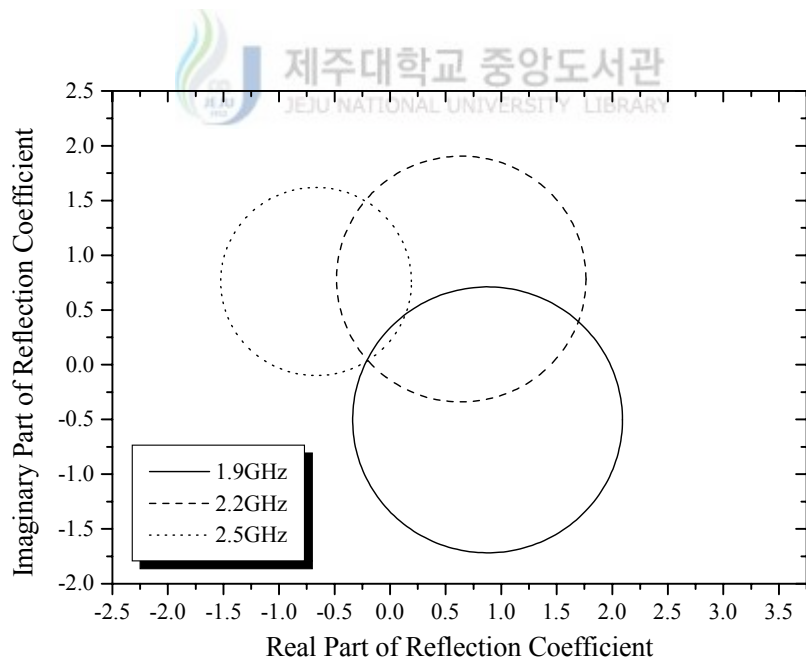


(b) Horizontal Polarization

Fig. 37. Circles of reflection coefficients for asphalt



(a) Vertical Polarization



(b) Horizontal Polarization

Fig. 38. Circles of reflection coefficients for turf

Table 7은 석분 대지, 아스팔트 대지, 그리고 잔디 대지에 대한 복소 유전상수의 추출 값을 나타낸 것이다. 각 대지의 전기적 특성은 Fig. 36, Fig. 37, Fig. 38에서 구한 수직편파와 수평편파의 반사계수를 식(39)의 복소 유전상수에 적용하여 구하였으며 일반적인 대지 특성보다 유전상수는 작고 도전율은 큰 값을 가졌다.

Table 7. Complex dielectric constants for three types of ground

Ground	Dielectric Constant	Conductivity(S/m)
Stone Powder	1.1656	0.1030
Asphalt	1.1616	0.0545
Turf	1.1236	0.0377



## 2. 회절손실 예측모델

전파 경로상의 장애물에 의한 손실을 예측하기 위하여 다중 장애물에 대한 구조적 해석 방법들을 제주 지형에 적용하여 적합한 방법을 찾고 그에 따른 보정인자를 제시하고자 한다.

### 1) 회절 손실

회절손실은 송신점에서 수신점 사이에 분포한 장애물의 수에 따라 단일 장애물과 다중 장애물로 구분하여 구해진다. 회절손실은 식(48)의 복소 프레넬 적분으



로 계산되어지나 다음과 같이 회절계수의 구간에 따른 계산 방법으로 회절손실 계산을 간략화 할 수 있다(Lee, 1992).

$$\begin{aligned}
 L_d &= 20 \log(0.5 + 0.62v) & 0 \leq v < 1 \\
 L_d &= 20 \log(0.5 e^{0.95v}) & -1 \leq v < 0 \\
 L_d &= 20 \log(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1v + 0.38)^2}) & -2.4 \leq v < -1 \\
 L_d &= 20 \log\left(-\frac{0.225}{v}\right) & v < -2.4
 \end{aligned} \tag{56}$$

Fig. 39는 회절손실 계산에서 식(48)의 복소 프레넬 적분과 Lee 방법의 결과를 나타내었다. Lee 방법은 회절계수의 구간 경계에서 약간의 불연속이 발생하지만 복소 프레넬 적분의 결과와 일치하도록 표현하였으며 장애물에 의한 회절손실을 구하는데 이용되었다.

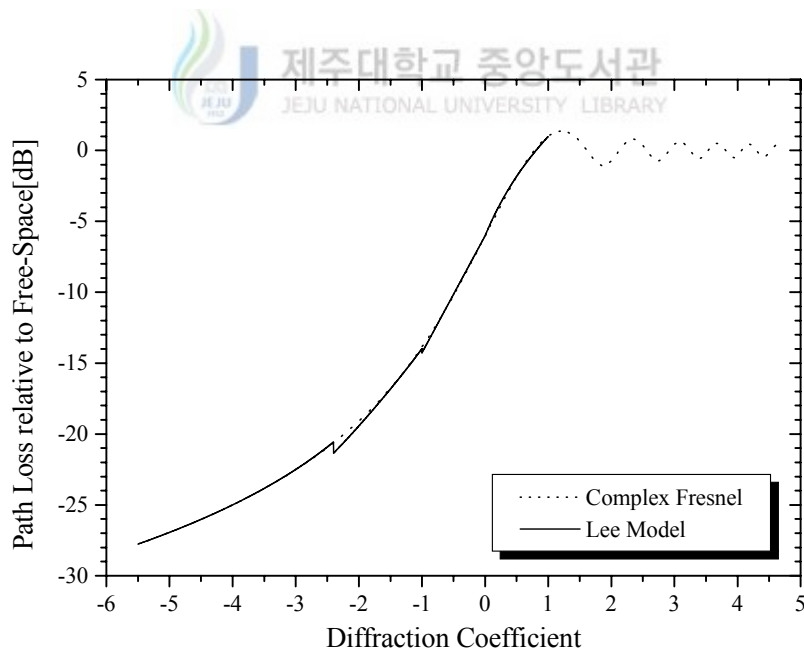
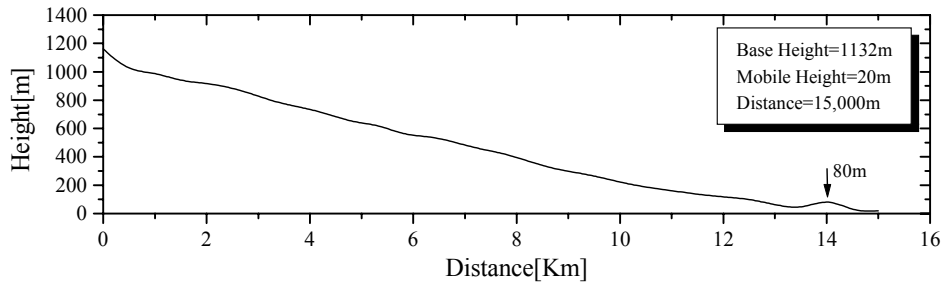
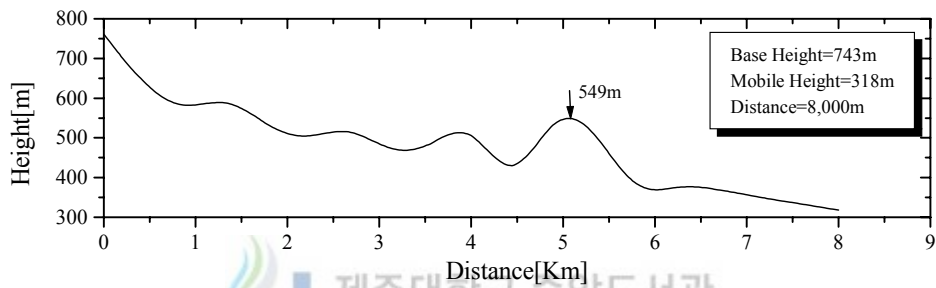


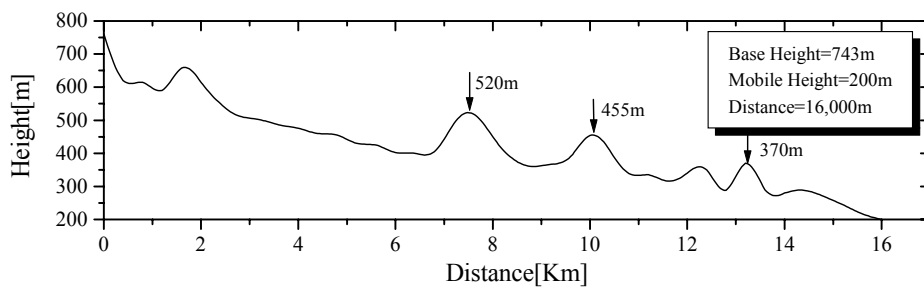
Fig. 39. Difference between complex Fresnel integral and Lee model



(a) Sample A : single obstacle ( $h < 0$ )



(b) Sample B : multiple obstacles ( $h > 0$  &  $h < 0$ )



(c) Sample C : multiple obstacles ( $h > 0$ )

Fig. 40. Profile of three sample points

전파 경로상의 장애물에 의한 회절손실을 예측하기 위하여 제주 지역의 회절

환경에 대해 장애물의 수와 회절 높이를 고려하여 표본을 선정하였고 송신점에서 표본 지점 사이의 지형 프로파일은 Fig. 40에 나타내었다. Fig. 40a는 14,200m의 수평 거리에 해발 높이 80m의 장애물이 있는 경우이며 송신점과 수신점의 해발 높이는 각각 1132m와 20m이고 수신점까지의 수평 거리는 15Km이다. Fig. 40b에 표현한 지형 분포에서 송신점과 수신점의 해발 높이는 각각 743m와 318m이고 수평 거리는 8Km이다. 여기서 여러 개의 불룩한 부분은 전파 경로상의 장애물이 될 수 있으며 4,800m 거리에 있는 해발 549m의 장애물에 의한 회절 높이가 가장 크다. Fig. 40c는 양의 회절 높이를 갖는 여러 개의 장애물이 분포한 경우이며 송신점과 수신점의 해발 높이는 각각 743m와 200m이며 수평 거리는 16Km이다.

Fig. 40의 표본들에 대해 Bullington 해석 방법, Epstein-Peterson 해석 방법, 그리고 Deygout 해석 방법을 적용하여 회절손실을 구한 결과를 비교하여 Table 8에 나타내었다.



Table 8. Comparison with field strength by three methods of diffraction

Sample Method	Diffraction Loss(dB)			Field Strength(dB $\mu$ V/m)		
	A	B	C	A	B	C
Bullington's	-4.6	-15.6	-17.4	72.7	65.7	57.8
Epstein-Perterson's	-4.6	-95.7	-296.5	72.7	-13.9	-221.2
Deygout's	-4.6	-18.4	-30.8	72.7	62.9	44.5
Measured Value				67.9	53.3	31.9

Fig. 40a는 수신점과 가까운 거리에 단일 장애물이 존재하는 경우이며 전파

경로상에 장애물이 유일하기 때문에 각각의 해석 방법들의 결과는 모두 0.1456의 회절계수와 4.6dB의 회절손실로 동일한 값을 가졌다. 그러나 다중 장애물에 대한 결과는 각각의 해석 방법의 특성에 의해 다른 값을 보였다. Fig. 40b에 나타난 다중 장애물의 회절 높이는 양의 값과 음의 값을 보였으며 Deygout 해석 방법으로 해석한 결과는 0.8171과 -1.6176의 회절계수로 16.3dB의 회절손실이 발생하였고 양의 값의 회절 높이를 갖는 다중 장애물이 분포한 Fig. 40c에서는 29.2dB의 손실이 발생하였다. Bullington 해석 방법은 여러 개의 장애물을 하나의 등가 장애물로 변환하기 때문에 장애물 구조가 서로 다른 Fig. 40b와 Fig. 40c에서 회절손실은 비슷한 15.6dB와 17.4dB가 발생하였다. Epstein-Perterson 해석 방법에서 전파 경로상에 분포한 모든 장애물은 해석 특성에 의해 단일 장애물로 작용하기 때문에 회절손실은 상대적으로 큰 값을 가졌다.

이와 같은 결과로부터 전파 경로상의 장애물에 대한 구조적 해석 방법에서 Bullington 해석 방법과 Epstein-Perterson 해석 방법은 제주 지형에 적합하지 않았고 Deygout 해석 방법은 측정치와 일정한 편차를 보였으며 일정한 오차에 대한 보정이 필요하였다.

## 2) 보정 회절계수

회절 환경에서 장애물에 의한 손실은 Deygout 해석 방법으로 구하였고 오차에 대한 보정 인자를 구하기 위해 대지면상의 볼록한 부분에 대한 영향을 분석하였으며 대지면상의 볼록한 부분에 대한 회절 높이를 구하였다. 이 회절 높이는 양의 값 혹은 음의 값을 가지게 되며 이 값들을 모두 더하여 이 값을 높이로 갖는 의사 장애물을 가정하였다. 회절손실에 대한 보정 인자는 의사 장애물의 회절계수로 정하고, 회절계수의 값들을 분석하였다. 의사 장애물에 대한 보정 회절계수

는 다음과 같이 회절 높이에 자연대수를 취하고 장애물의 수로 나눈 값이다.

$$v_{so} = -\frac{1}{m_o} \ln h_{so} \quad : \quad m_o > 1 \quad (57)$$

여기서  $h_{so}$ 는 의사 장애물의 회절 높이이고  $m_o$ 는 전파경로 상에 분포하는 볼록한 부분의 수이다. Table 9는 Fig. 40에 나타난 표본 환경에 대한 장애물의 지형 데이터와 식(57)의 회절계수의 값을 나타낸다. Fig. 40a는 단일 장애물이 있는 환경이므로 제외하였으며 Fig. 40b에서 예상 장애물의 수는 5개이다. 각 장애물의 회절 높이를 이용하여 구한 가상 장애물에 대한 보정 회절계수는 -0.7521이고, 이에 대한 손실은 11.2dB가 발생하였다. Fig. 40c의 환경에서는 10개의 예상 장애물이 존재하기 때문에 각 장애물에 대한 회절 높이를 이용하여 가상 장애물의 회절 높이를 구하였고 이에 대한 보정 회절계수는 -1.8275이고 손실은 12.1dB가 발생하였다. Table 9에 Fig. 40의 표본 지점 B와 C에 대한 Deygout 방법과 회절손실 보정인자에 의한 예측 방법을 비교하였다. 다중 장애물이 분포한 표본 환경에서 보정손실을 적용한 전계강도는 측정치와의 오차가 3dB 이내의 분포를 보였다.

Table 9. Comparison with field strength at samples B and C

Sample	Measured Data (dB $\mu$ V/m)	Deygout's Method (dB $\mu$ V/m)		Predicted Method (dB $\mu$ V/m)	
		Value	Error	Value	Error
B	53.3	62.9	9.6	51.7	1.6
C	31.9	44.5	12.6	32.4	0.5

직접 경로상의 장애물에 대한 회절계수를 구하고 그 값들 중에서 가장 큰 회절계수를 갖는 장애물을 기준 장애물로 지정한 후 송신점과 기준 장애물 사이 그리고 기준 장애물과 수신점 사이의 장애물에 대한 회절계수를 구하여 수신 전계강도를 예측하도록 회절손실 예측모델 알고리즘을 구성하였다.

### 3. 알고리즘

이 절에서는 본 논문에서 제안한 전계강도 예측모델에 대한 알고리즘을 Fig. 41에 나타낸 흐름도에 의해 설명한다.

송신 시스템의 안테나 위치 및 높이, 송신 전력 및 주파수 등과 같은 시스템 성능의 변경과 전파 경로상의 지형 및 인공 구조물과 같은 환경 요인 등의 영향에 의한 전파전파 특성을 분석하기 위하여 전파 현상의 정확한 이해와 연구가 반드시 필요하다.

전계강도 분포의 표현은 서비스 영역에 대한 지형 정보가 있어야 하므로 본 논문에서는 제주 지형과 대지면의 환경을 데이터화하였다. 고도 데이터를 250m 간격으로 표본화하였고, 보다 자세한 고도 데이터를 만들기 위하여 컨벡스(convex) 조합식을 이용한 선형 보간법(부록II-지형 데이터 분석)을 사용하였다. 그리고 오름 데이터는 제주 지형의 오름들이 독립된 기생화산들이기 때문에 25m로 보간된 데이터에 위치 및 고도를 입력하였다. 컨벡스 조합식을 이용한 선형 보간법은 두 지점의 고도가 알려진 경우 두 지점 사이에 존재하는 모든 점의 고도를 구할 수 있다. 또한 대지면의 환경 데이터를 구성하기 위하여 제주의 위성사진(부록 I)을 24bit의 색상으로 스캐닝하였다. 즉 R(red), G(green), B(blue)는 각각 256 레벨을 갖는다.

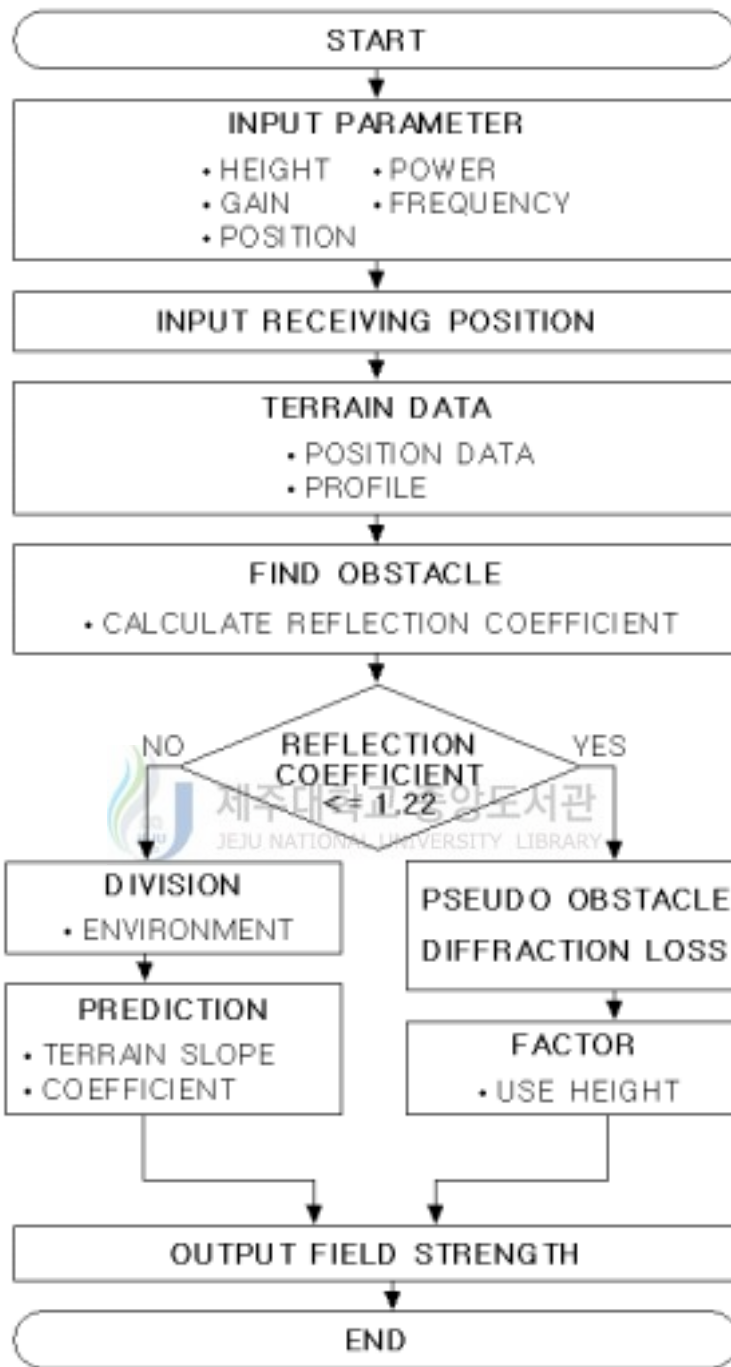


Fig. 41. Flow chart for the field strength prediction program

위성사진에서 구분된 색은 8가지이므로 임의의 화소에서 128레벨을 기준으로 128보다 큰 레벨이면 1, 작으면 0으로 RGB의 레벨을 다시 설정하여 대지면의 환경 데이터를 구성하였다. 이 데이터들은 1,661×2,971의 크기를 가지며 송신점과 수신점이 결정된다면 지형 데이터에서 두 지점간의 지형 높이를 읽고 이를 바탕으로 지형 프로파일, 전파 경로상의 장애물의 유무 확인, 지형 기울기 계산, 회절손실 계산, 그리고 수신점의 전계강도를 계산한다.

알고리즘은 Matlab을 이용하여 프로그램(부록Ⅱ)하였으며, 실행 과정에서 송신 시스템의 제원 입력과 송신점 및 수신점의 위치 입력은 마우스를 이용하여 처리할 수 있도록 구성하였다. 송신점과 수신점 선정이 이루어지면 지형 프로파일을 도출하고, 전파 경로상의 예상 장애물을 찾고 예상 장애물에 대한 회절계수를 계산하여 전파 환경을 구분한다.

지형 프로파일은 두 지점간의 거리를 400 등분하여 각 위치에 대한 지형 높이를 지형 데이터에서 이차원 보간을 이용하여 계산하도록 구성하였다. 즉, 400개의 위치에 대한 고도를 계산하기 위하여 각 위치가 중앙에 위치하도록 하는 가장 가까운 4개의 위치의 높이를 고도 데이터로부터 읽고, 이차원 보간을 시행하였다. 전파 경로상의 예상 장애물의 위치는 지형 기울기가 양에서 음으로 변화하는 위치이기 때문에 398개의 위치에 대한 기울기의 값을 계산하여 양과 음의 변화가 일어나는 위치를 찾도록 순차 계산법으로 적용하였다.

예상 장애물에 대한 회절계수는 장애물의 위치 데이터가 필요하므로 장애물 위치의 결과를 이용하여 회절 높이와 송신점에서 장애물까지의 거리를 구하였다. 여기서 회절 높이는 송신점과 수신점을 연결한 직선과 장애물의 높이 차이기 때문에 이 직선의 방정식과 장애물에 대한 회절계수의 계산 방법으로 구하였다.

회절이 발생하는 환경 구분은 회절계수 값이 1.22일 때를 기준으로 하였다. 1.22의 회절계수 산출은 회절계수의 이론적 분포와 표본지점의 전계강도 분포에



의해 구하였다. 장애물에 대한 회절계수의 최소값이 1.22보다 크면 가시거리 환경이며 1.22보다 작거나 같으면 회절 환경으로 구분되도록 조건문을 사용하였다.

가시거리 환경에 대한 예측모델을 구하기 위해서는 지형 기울기를 계산하고, 수신점에 대한 대지면의 환경 특성 값을 구하여야 한다. 지형 기울기는 지형 기울기 계산 결과를 이용하여 정규분포의 95.45%에 해당하는 데이터의 중앙값을 계산하여 구하였고, 대지면의 환경 특성 값은 수신점 위치 정보에 대응하는 반사계수를 예측모델에 적용할 수 있도록 대지면의 환경 데이터를 이용하였다.

회절 환경에서 회절손실 예측모델을 얻기 위해서는 장애물에 대한 구조적 해석 방법 적용과 회절손실 보정인자를 구하여야 한다. 구조적 해석 방법은 장애물 위치에 대한 결과를 이용하여 3장 1절 5항에서 찾은 해석 방법을 이용하였고, 보정인자는 의사 장애물의 회절계수를 구하여 예측모델에 적용할 수 있도록 하였다.



## IV. 측정 시스템 및 표본 환경

본 논문에서는 가시거리 환경에서의 전파 예측모델과 회절 환경에 대한 예측모델을 제시하였고 그에 대한 적합성을 고찰하기 위해 가시거리 환경과 회절 환경의 조건에 알맞은 표본을 선정하고 송신과 수신 시스템을 구성한다. 또한 대지의 특성에 의한 반사계수의 변화와 대지면의 전기적 특성을 추출할 수 있도록 측정 시스템을 구성하였다.

### 1. 송신과 수신 시스템

예측모델의 적합성을 확인하기 위해 사용된 송신 시스템은 무선호출 시스템과 개인휴대통신 시스템이다. 무선호출 시스템의 신호는 주파수변조 방식이며 324.75MHz의 실험 주파수를 사용하였고 측정에 이용된 송신국은 해발 743m의 건월악 송신국과 해발 1132m의 세오름 송신국이다. 송신 시스템의 제원을 Table 10에 나타내었다.

Table 10. Specifications of transmitter and antenna equipments

Main	Type	Mode		Modulation
	16K0F2D	Simplex		Frequency
Antenna	Type	Power	Directivity	Polarization
	Collinear	100W	Omni	Vertical

개인휴대통신 시스템인 경우 제주대학교 해양대학 4층 건물에 설치된 송신국을 사용하였고, 측정에 사용된 주파수는 1843.75MHz이다.

무선호출 주파수와 개인휴대통신 주파수에 대한 신호 세기를 측정하기 위해 구성된 수신 시스템을 Fig. 42에 나타내었다. 전계강도 수신기는 25MHz에서 999.99MHz의 수신 주파수 범위를 가지며 대역폭은 15KHz와 120KHz이고 수신 신호 방식은 주파수 변조와 진폭 변조이다. 주파수 변환기는 1GHz에서 3GHz의 범위를 갖는다. 그리고 데이터 저장 및 하드웨어를 제어하기 위해 컴퓨터가 이용되었다. 측정 데이터는 실시간 처리되어 컴퓨터에 저장될 수 있도록 GPIB interface card로 수신 장치와 휴대용 컴퓨터를 연결하였고 프로그램에 의해 수신기를 제어할 수 있도록 하였다. 측정에 사용된 수신 시스템의 제원은 Table 11과 같다.

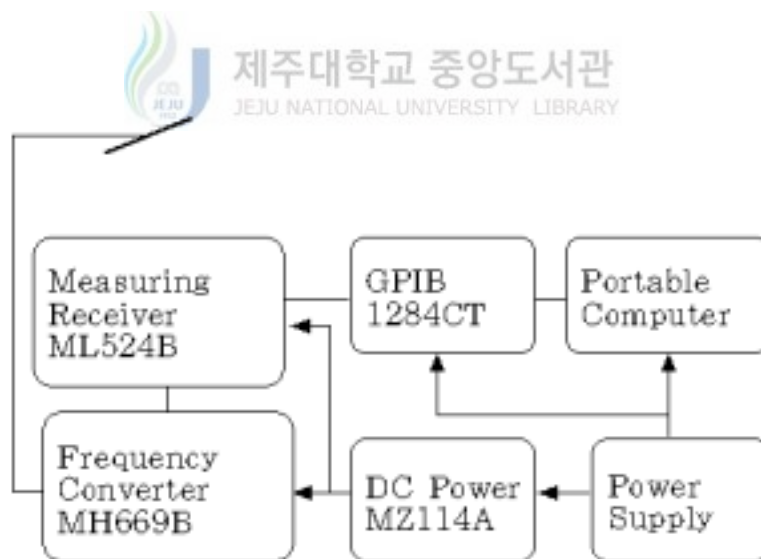


Fig. 42. Diagram of Receive equipment system

Table 11. Specifications of receive equipments

Equipment Name	Frequency Range	Output(Input) Level
Measuring Receiver	25MHz to 1.0GHz	5 to 100dB $\mu$ V
Frequency Converter	1.0GHz to 3.0GHz	150MHz to 1GHz
Dipole Antenna	200 to 999.9MHz	40dBm(maximum)
Dipole Antenna	1.7GHz to 3.0GHz	1.6 to 3.4dBi
Log-Periodic Antenna	200 to 2000MHz	40dBm(maximum)

## 2. 측정 방법

전계강도의 분포를 얻고 예측모델의 적합성을 파악하기 위하여 세오름과 건월악에 설치된 송신국을 중심으로 제주 전지역에 대하여 차량을 이용한 이동 측정과 여러 가지 환경을 고려한 표본 지점에 대하여 고정 측정을 실시하였다. 또한 서비스 송신국을 중심으로 측정을 하였기 때문에 측정은 서부 지역과 동부 지역으로 구분하였다. 그리고 개인휴대통신의 전파 환경에 대한 측정을 위하여 제주대학교내에 표본 지점을 정하였다.

### 1) 이동 측정

세오름 송신국과 건월악 송신국에 대한 이동 측정은 지형 분포에 의한 전계강도 분포를 얻기 위해 평균 시속 40Km를 유지하면서 Fig. 43에 나타낸 제주의 주요 도로상에서 이루어졌다. 측정 데이터는 휴대용 컴퓨터에 설치된 제어 프로그램에 의해 실시간 처리되도록 하였고 37Kbyte/Km의 전계강도 데

이터를 얻었다. 서부 지역의 측정에서 12번 도로는 해안을 따라 제주시와 서귀포시를 연결한 도로이고, 16번 도로와 1116번 도로는 제주의 중산간에 위치한 도로이며 도로의 주변 환경은 인가와 농경지로 이루어져 있다. 1111번 도로는 개활 환경이며, 1117번 도로와 1115번 도로는 지세가 험하며 오름 때문에 회절 환경이 대부분이다. 99번 도로는 지세가 매우 험하고 도로 주변에는 다양한 산림이 분포되어 있다.



Fig. 43. Road map of Cheju

동부 지역의 측정에서 12번 도로는 서부 영역의 12번 도로와 같이 제주의 동쪽 해안을 따라 형성되었고 도로 주변은 대부분 인가와 농경지이다. 16번 도로의 주변은 서부 지역과는 달리 많은 오름이 분포하여 다양한 회절 환경을 가졌으며, 101번 도로와 1113번 도로는 개활 환경이다. 1112번 도로는 산림 영역을 지나는 부분이 많았다. 11번 도로는 지세가 험하고 도로 주변이 매우 다양한 환경이며 한라산의 동쪽 부분을 횡단하는 도로이다.

서부 지역에 분포한 7개 도로의 총 길이는 253.2Km이고 동부 지역에서의 총 길이는 313.7Km이며, 지역별 도로에 대한 정보를 Table 12와 Table 13에 표현하였다.

Table 12. Measuring routes in western area of Cheju

Site	Road Name	Distance (Km)	Route
Se Orm	12	88.0	Cheju → Sögwip'ö
	16	65.2	Cheju → Ch'angch'ön
	99	34.0	Chungmun → Cheju
	1111	31.0	Bosöng → Musuch'ön
	1115	12.5	1111th road → Tamna Univ.
	1116	11.2	16th road → Kumak
	1117	11.3	Hanbak → 1111th road

Table 13. Measuring routes in eastern area of Cheju

Site	Road Name	Distance (Km)	Route
Kyonwol Orm	12	89.0	Sögwip'ö → Hwapuk
	16	91.0	Cheju → Sögwip'ö
	11	35.4	Sögwip'ö → Cheju
	101	32.5	Choch'ön → Namwon
	1112	28.3	11th road → P'yongdae
	1113	37.5	Cheju → P'yosön

## 2) 고정 측정

가시거리 환경에 대한 예측모델과 회절손실 예측모델의 적합성을 고찰하기 위해 표본 지점을 선정하였으며 지형 위치는 Fig. 44에 나타내었다. 가시거리 환경에서의 표본은 반사점이 초지 환경과 산림 환경에서 발생하도록 수신 위치를 선정하였으며, 회절 환경에서는 전파 경로상의 장애물에 의해 단일 및 다중 회절 현상이 발생하도록 수신 위치를 선정하였다. 표본의 수는 동부 지역에서 14개의 지점과 서부 지역에서 16개의 지점이다. 표본 지점의 지형 높이와 송신점에서 표본 지점까지의 거리는 서부 및 동부 지역에 따라 각각 Table 14와 Table 15에 나타내었다. 측정의 정확성을 기하기 위해 표본 지점과 좌우 250m 지점에서 일정 시간동안 측정하였다.

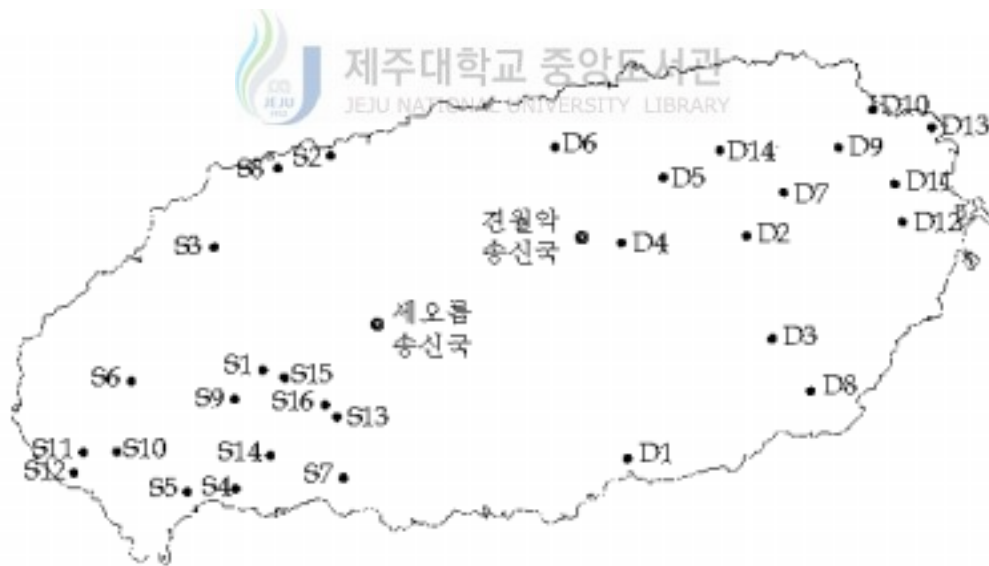


Fig. 44. Sample points for measuring in Cheju

Table 14. Parameter values of sample points in western area

Position	Distance (Km)	Height (m)	Position	Distance (Km)	Height (m)
S1:Kwangp'yong	10.00	430	S9:Tonggwang	12.38	310
S2:Hagwi	15.00	20	S10:Murung	22.50	61
S3:Ödo	15.00	87	S11:Murung	25.00	30
S4:Andök	15.00	110	S12:Yongnak	25.90	20
S5:Sagye	20.00	32	S13:Sangch'ön	8.30	400
S6:Chöji	20.00	123	S14:Ch'angch'ön	13.10	175
S7:Chungmun	11.55	120	S15:Kwangp'yong	8.33	488
S8:Sinum	15.45	48	S16:Ch'önmi	8.15	415

Table 15. Parameter values of sample points in eastern area

Position	Distance (Km)	Height (m)	Position	Distance (Km)	Height (m)
D1:Wimi	16.00	80	D8:Sehwa	20.00	75
D2:Taech'ön	12.00	278	D9:Pijarim	20.00	125
D3:Kashi	16.00	140	D10:P'yongdae	24.00	20
D4:Kgorae	4.00	460	D11:Sangdo	24.00	83
D5:Wasan	8.00	318	D12:Susan	24.00	94
D6:Toryon	8.00	130	D13:Hado	28.00	22
D7:Songdang	16.00	200	D14:Isidol	12.00	187



### 3) 제주대학교내에서의 측정

개인휴대통신의 전파 환경에 대한 전파 예측 방법의 적합성을 고찰하기 위해 제주대학교 해양대학 건물에 설치된 송신국에 대한 표본 지점을 선정하였고 송신 위치 및 표본 위치를 Fig. 45에 표현하였다.

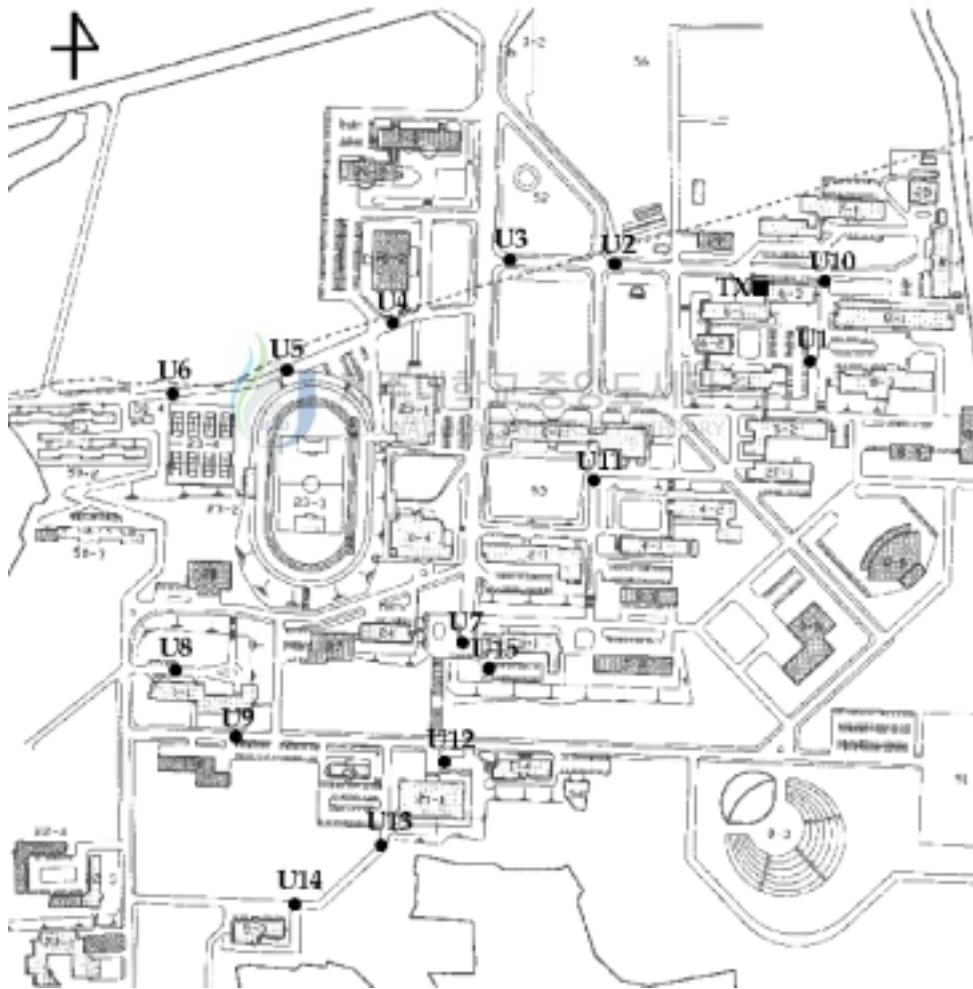


Fig. 45. Sample points for measuring at Cheju Nat'l Univ.

Fig. 45에 나타난 표본 지점은 제주대학교내에서 가시거리 환경과 회절 환경이 뚜렷한 곳을 선정하였으며 표본의 수는 15지점이다. 표본 지점에 대한 지형 높이와 송신점에서 표본 지점까지의 거리를 Table 16에 나타내었다.

Table 16. Parameter values of sample points at Cheju Nat'l Univ.

Position	Distance (m)	Height (m)	Position	Distance (m)	Height (m)
U1	105	295.0	U9	636	319.5
U2	111	287.2	U10	105	289.5
U3	210	287.5	U11	210	299.5
U4	315	287.3	U12	540	327.8
U5	465	286.0	U13	654	327.5
U6	540	282.0	U14	726	330.5
U7	420	313.8	U15	420	314.5
U8	633	318.5			

제주대학교의 지형 분포는 해발 270m에서 360m에 이르며 면적은 101헥타르(hectare)의 장방형으로 30여 동의 3층과 4층 건물이 분포하고 있으며 지형 높이는 1m 등고선 간격으로 표현된 지형도(부록Ⅲ)를 이용하여 데이터를 구성하였다. 제주대학교에서의 측정 방법은 건물에 의해 발생하는 회절 환경과 가시거리 환경에 대한 표본 지점에서 일정 시간동안 2회 반복 고정 측정을 하였으며 1회 측정에 대한 수신 데이터의 수는 1,600개이다. 특히 개인휴대통신의 서비스 범위는 상대적으로 무선호출 서비스 영역보다 매우 작기 때문에 거리에 따른 수신 전계강도에 대한 측정 방법을 적용하였다.

## V. 결과 및 고찰

실제 환경에서 보다 정확한 수신 전계강도를 예측하기 위해서는 전계강도 예측방법과 필요한 파라미터의 적절한 선택이 중요하며, 또한 적합성 여부를 평가해야 한다. 본 논문의 예측모델에 적용된 주요 파라미터는 가시거리 환경에서 대지의 전기적 특성과 대지면의 환경 특성, 그리고 지형 기울기이고 회절 환경에서는 장애물에 대한 구조적 해석 방법과 회절손실 보정인자이다. 이들 파라미터의 적합성을 확인하기 위하여 측정 데이터와 전계강도 데이터를 비교하여 분석한다.

### 1. 가시거리 예측모델

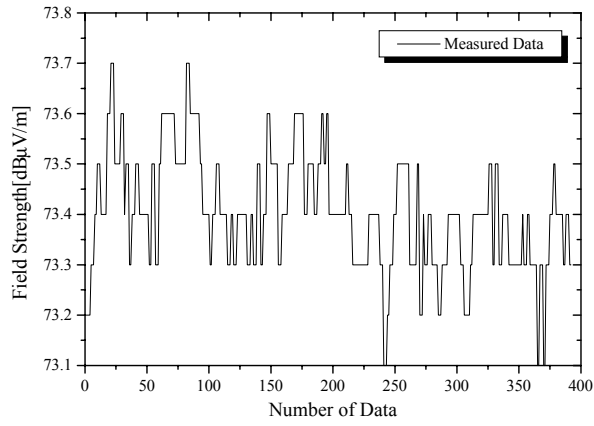


가시거리 환경에서 대지의 전기적 특성과 반사 대지면의 환경 특성, 그리고 지형 기울기를 적용하여 구한 예측치와 측정 데이터를 비교하여 분석하였다. Table 17에는 각 표본지점에 대한 송신점과 수신점 사이의 지형 기울기, 지형 기울기에 의해 변환된 송신 안테나 높이, 그리고 송신점에서 수신점까지의 거리를 나타내었다. 가장 작은 지형 기울기를 갖는 D13 표본 지점에서 송신 안테나 높이는 761m에서 139.1m로 되었고, 거리는 28,006m로 6m가 길어졌다. 가장 큰 지형 기울기를 보인 S16 표본 지점에서 송신 안테나 높이는 1160m에서 95m로 되었고, 거리는 26m가 길어졌다. 나머지 표본지점에서도 지형 기울기에 의해 지형 특성에 적합한 파라미터로 변환되었으며 가상 평면이 실제 지형에 접근하여야 하기 때문에 지형 기울기에 의해 거리보다는 송

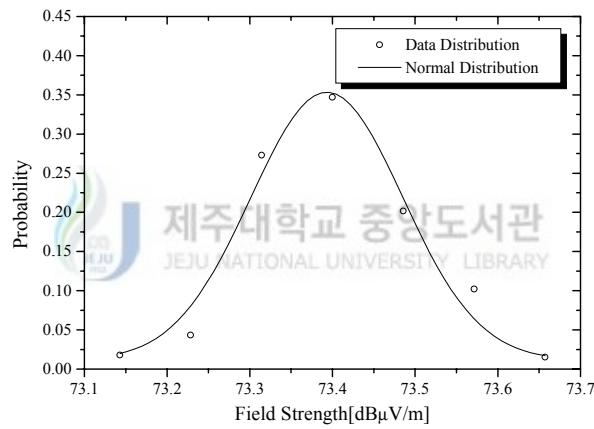
신 안테나의 높이가 크게 달라졌다.

Table 17. Modified parameters of sample points by terrain slope

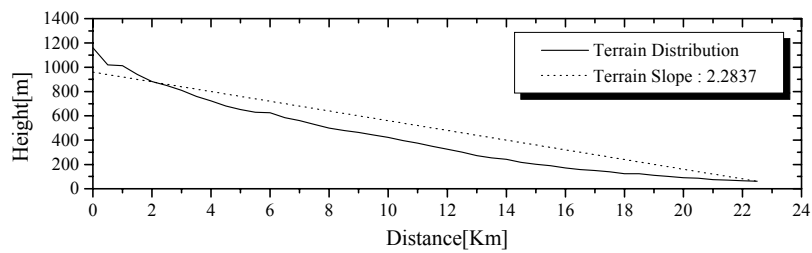
Sample point		Terrain Slope (degree)	Height (m)	Distance (Km)
Grassland	D6	3.4115	154.1	8,014
	S6	2.3515	215.8	20,017
	S8	3.9114	55.6	15,486
	S9	3.0295	194.8	12,397
	S10	2.2837	201.7	22,518
	S12	1.8444	306.0	25,913
	S14	3.7357	129.7	13,128
	S15	4.1712	64.5	8,352
	S16	4.5601	95.0	8,176
Forest	D4	3.3658	65.8	4,007
	D13	1.2274	139.1	28,006
	S1	3.1471	180.2	10,015
	S4	3.3853	162.7	15,026
	S5	2.3780	297.4	20,017
	S7	4.3701	157.3	11,584
	S11	1.7179	380.2	25,011



(a) Measured data

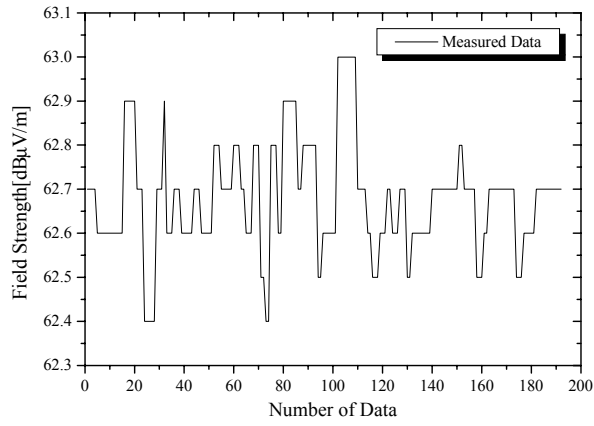


(b) Data distribution

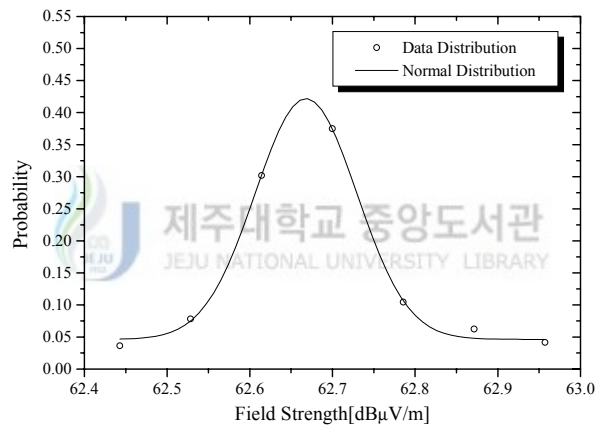


(c) Profile

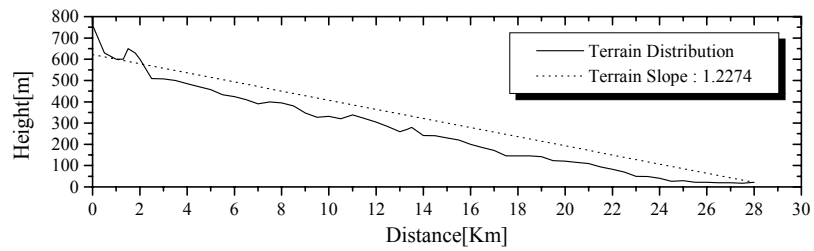
Fig. 46. Profile and field strength for sample S10



(a) Measured data



(b) Data distribution



(c) Profile

Fig. 47. Profile and field strength for sample D13

Fig. 46과 Fig. 47은 Table 17의 일부 표본에 대한 지형 프로파일과 전계강도 분포를 나타낸 것이다. 지형 분포를 Fig. 46c에 표현한 표본 지점 S10은 세오름 송신국에 대한 표본으로 송신점에서 수신점까지의 수평 거리가 22,500m이고 수신 높이는 해발 61m이며, 지형 기울기는  $2.28^\circ$ 가 되었다. Fig. 46a는 표본 지점 S10의 측정 데이터의 분포를 나타낸 것으로 0.6dB의 변동폭을 보였다. 측정 데이터에 대한 백분율을 구하여 Fig. 46b에 도시하였으며 그 결과 데이터의 분포는 정규분포에 접근하였다.

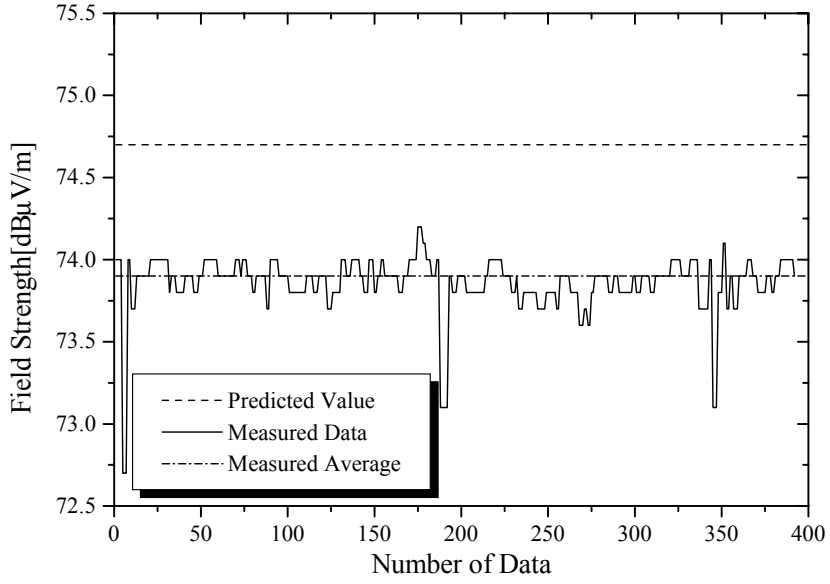
Fig. 47c는 표본 지점 D13의 지형 분포를 나타낸 것이다. 표본 지점 D13은 견월악 송신국에 대한 표본으로 28Km의 수평 거리와 해발 22m의 수신 높이, 그리고  $1.23^\circ$ 의 지형 기울기를 가졌다. Fig. 47a는 표본 지점 D13의 측정 데이터의 분포를 나타낸 것으로 서부 지역의 표본 S10의 결과와 유사한 0.6dB의 변동폭을 보였다. Fig. 47b는 측정 데이터에 대한 백분율을 구하여 나타낸 것으로 정규분포에 접근하였다. 한편 모든 표본에서 지형 프로파일에 표현한 가상 평면은 실제 지형을 대신할 수 있었고, 지형 기울기는 제주의 지형 높이에 따른 경사 분포와 유사하였다. 또한 측정 데이터의 분포는 정규분포에 접근하였기 때문에 모든 표본에 대한 측정 데이터를 정규분포 함수에 적용하여 측정 데이터의 대표값을 구하였다.

Table 18은 주파수가 324.75MHz일 때 동부 지역과 서부 지역의 표본 지점에 대한 측정 전계강도 값을 직접파·반사파 모델 및 제안된 모델을 이용하여 계산한 값과 비교한 것이다. 측정 데이터는 정규분포 함수에 적용하여 평균과 표준편차를 구하였고 직접파·반사파 모델의 전계강도는 대지면의 전기적 특성을 평균 대지로 가정하였을 때의 결과이다. 그리고 제안된 모델의 평균과 표준편차는 지형 기울기에 의해 변형된 가상 평면상에서 대지면의 특성을 적용하여 구한 결과이다.

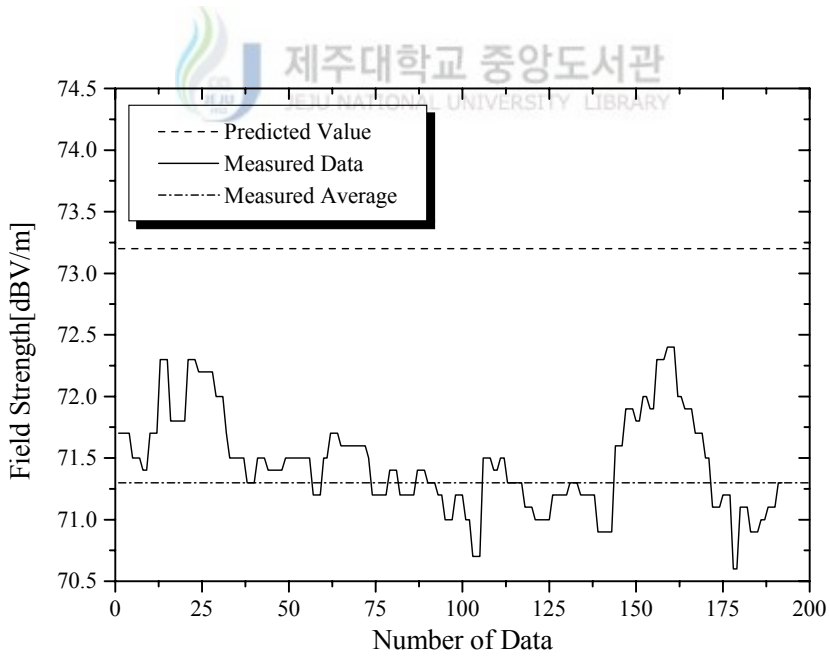
Table 18. Comparison with field strength for sample points in case of line of sight

Sample Point	Measured Data (dB $\mu$ V/m)		Two-Ray Model (dB $\mu$ V/m)	Modified Model (dB $\mu$ V/m)	
	Mean	Deviation		Mean	Deviation
D4	79.2	1.37	90.1	84.3	0.62
D6	78.9	0.41	86.3	80.1	0.29
D13	62.7	0.12	70.1	65.6	1.18
S1	74.2	0.14	84.6	78.1	0.54
S4	71.3	0.51	82.3	73.2	0.93
S5	69.0	0.16	79.1	71.4	0.71
S6	70.7	0.40	79.0	72.8	0.42
S7	75.1	0.73	84.5	76.0	0.77
S8	73.9	0.19	82.1	74.7	0.48
S9	75.3	0.37	83.7	77.4	0.35
S10	73.4	0.18	77.5	71.6	0.44
S11	71.9	0.31	76.0	69.6	0.69
S12	72.9	0.30	75.5	70.6	0.41
S14	77.7	0.88	83.5	76.4	0.43
S15	81.2	0.80	85.0	80.2	0.46
S16	83.4	0.53	85.1	80.6	0.41





(a) Grassland sample S8



(b) Forest sample S4

Fig. 48. Field strength distribution and predicted value

측정 데이터의 평균 표준편차는 0.46dB의 값을 보였고 표본 지점 D4에서 최대 1.37dB의 표준편차가 발생하였으며, 표본 지점 D4의 전계강도 평균은 직접파·반사파 모델과 예측 평균값에서 각각 10.9dB와 5.1dB의 가장 큰 오차를 보였다. 측정 데이터의 평균과 직접파·반사파 모델의 전계강도간의 오차는 1.7dB에서 10.9dB의 범위를 가졌고, 예측 평균값간의 오차는 0.8dB에서 5.1dB의 범위를 보였다. 예측 데이터의 평균 표준편차는 0.57dB가 발생하였으며, 표본 지점 D13에서 가장 큰 1.18dB를 보였다. 예측 데이터의 변동폭은 대지면의 환경 특성에 의한 영향을 나타낸 반사계수에 의해 1dB 이내의 영역에서 발생하였으며 표본 지점 S8과 S4에 대한 예측 데이터의 평균과 측정 데이터의 분포를 Fig. 48에 나타내었다. 초지 환경에서 반사점이 발생하는 표본 지점 S8에 대한 측정 데이터는 0.19dB의 표준편차를 보이면서 예측치와 0.8dB의 오차를 보였고 산림 환경에서 반사점이 발생하는 표본지점 S4에서는 0.51dB의 측정 표준편차를 보였고 측정치와 1.9dB의 오차를 보였다. 또한 모든 표본 지점에서 유사한 결과를 얻었다.

Table 19는 주파수가 1843.75MHz일 때 제주대학교에서 표본 지점에 대한 전계강도 측정 데이터, 직접파·반사파 모델, 그리고 제안된 모델을 비교한 것이다. 측정 데이터는 정규분포에 적용하여 평균과 표준편차를 구하였고 직접파·반사파 모델의 전계강도는 대지면의 전기적 특성을 평균 대지로 가정하였을 때의 결과이다. 그리고 예측치는 지형 기울기에 의해 변형된 가상 평면상에서 대지면의 특성을 적용하여 구하였다.

측정 데이터의 평균 표준편차는 0.88dB의 값을 가졌고 표본 지점 U6에서 최대 1.09dB의 표준편차가 발생하였다. 측정 데이터의 평균과 직접파·반사파 모델의 전계강도간의 오차는 0.9dB에서 12.2dB의 범위를 가졌고, 예측 평균값간의 오차는 0.0dB에서 3.1dB의 범위에서 발생하였다.

두 주파수에 대하여 예측치와 측정치의 오차가 3dB 이내의 값을 가지므로 파라미터를 적용한 예측모델은 가시거리 환경에서 적합하다.

Table 19. Comparison with field strength at Cheju Nat'l Univ. in case of line of sight

Sample Point	Measured Data (dB $\mu$ V)		Two-Ray Model (dB $\mu$ V)		Modified Model (dB $\mu$ V)	
	Mean	Deviation	Mean	Error	Mean	Error
U1	57.9	0.90	58.8	0.9	61.0	3.1
U2	48.5	0.66	60.7	12.2	50.8	2.3
U3	57.5	0.92	66.2	8.7	58.1	0.6
U4	57.2	0.77	58.4	1.2	57.2	0.0
U5	59.1	1.04	61.1	2.0	59.5	0.4
U6	57.7	1.09	65.7	8.0	58.1	0.4
U7	49.9	0.72	54.9	5.0	48.9	1.0
U8	52.6	0.84	53.9	1.3	50.6	2.0
U9	48.9	1.03	52.1	3.2	48.2	0.7

## 2. 회절손실 예측모델

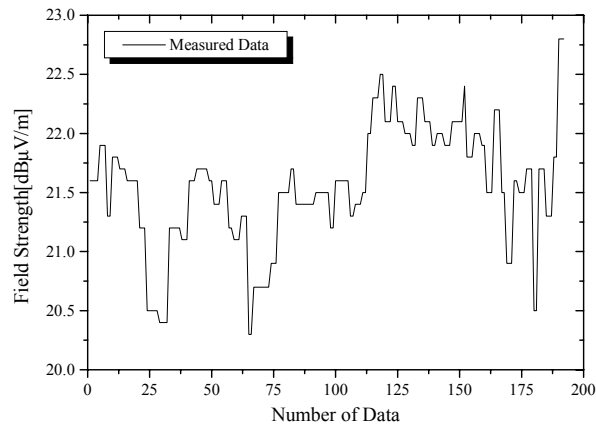
회절 환경에서는 전파 경로상의 장애물에 대한 구조적 해석 방법과 회절손실 보정인자를 적용하여 구한 예측치와 측정 데이터를 비교하여 분석하였다.

Table 20에는 전파 경로상의 기준 장애물에 대한 정보와 예상 장애물의 회

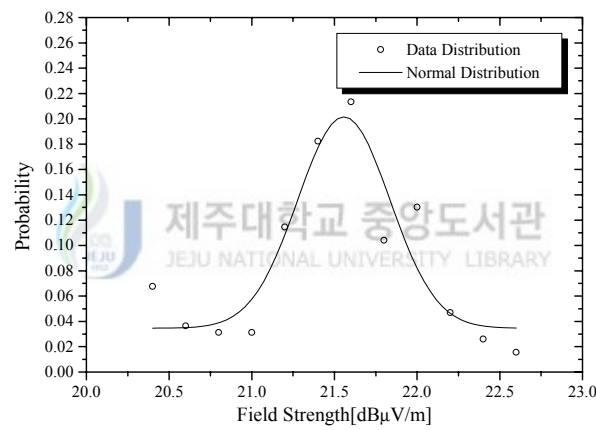
절 높이를 이용하여 계산한 가상 장애물의 회절계수를 나타내었다. 표본 지점 S2와 S3은 전파 경로상의 장애물이 하나이기 때문에 의사 장애물에 대한 회절계수가 없으며, 나머지 표본 지점은 전파 경로상의 다중 장애물에 대한 회절 높이를 적용하여 의사 장애물에 대한 회절계수를 구하였다. 표본 환경에 대한 의사 장애물의 회절계수는 표본 지점 D8에서 최소의 보정 회절계수 -0.4488 을 보였고 표본 지점 D3에서 최대의 보정 회절계수 -2.199가 발생하였다.

Table 20. Diffraction coefficients of principal and pseudo obstacles

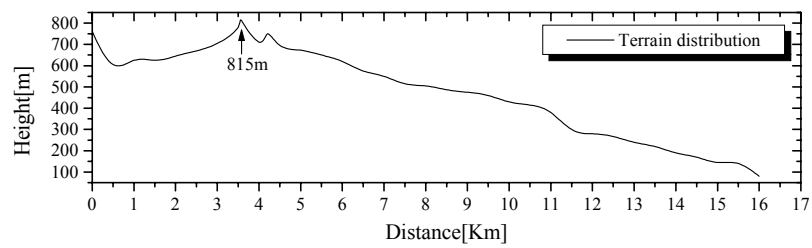
Sample Point	Principal Obstacle			Pseudo Obstacle Diffraction Coefficient
	Height(m)	Distance(m)	Diffraction Coefficient	
S2	80.1	14,187	0.2059	—
S3	1069.9	2,200	-2.2704	—
D1	815.1	3,565	-5.7381	-0.8627
D2	400.7	8,440	0.6524	-1.6732
D3	290.0	14,280	-3.0501	-2.1990
D5	512.9	4,822	-1.8038	-0.7521
D7	370.0	13,300	-2.2806	-1.8275
D8	511.9	8,957	-1.1948	-0.4488
D9	155.8	18,357	0.8913	-1.4799
D10	693.3	1,540	0.7866	-1.4520
D11	464.2	9,337	0.6603	-1.3812
D12	250.1	17,936	0.3093	-1.3486
D14	606.9	3,541	-0.4319	-0.6567



(a) Measured data



(b) Data distribution



(c) Profile

Fig. 49. Profile and field strength for sample D1

Fig. 49는 표본 지점 D1에 대한 측정 데이터, 정규분포 곡선, 지형 프로파일  
 을 표현한 것이다. 모든 표본 지점에 대한 측정 데이터의 분포는 가시거리  
 환경에서의 데이터 분포와 동일하게 정규분포를 가졌고 정규분포의 중앙값을  
 대표값으로 하였으며 Fig. 49에서와 같이 측정치의 변동폭은 2dB이다.

Table 21. Comparison with field strength for sample points in case  
 of diffraction

Sample Point	Measured Data (dB $\mu$ V/m)		Deygout's Method (dB $\mu$ V/m)		Predicted Method (dB $\mu$ V/m)	
	Mean	Deviation	Value	Error	Value	Error
S2	67.9	0.13	72.7	4.8	67.0	0.9
S3	61.8	0.19	59.9	1.9	58.5	3.3
D1	21.5	0.56	32.7	11.2	20.7	0.8
D2	65.4	0.65	73.9	8.5	63.8	1.6
D3	28.2	0.46	49.7	21.5	30.3	2.1
D5	53.3	0.37	62.9	9.6	51.7	1.6
D7	31.9	2.21	44.5	12.6	32.4	0.5
D8	49.2	0.14	58.2	9.0	49.2	0.0
D9	56.8	0.39	73.0	16.2	57.1	0.3
D10	55.1	0.28	71.2	16.1	55.4	0.3
D11	50.3	0.08	69.1	18.8	53.6	3.3
D12	57.5	0.30	68.6	11.1	53.2	4.3
D14	54.1	1.07	68.2	14.1	57.9	3.8

Table 21은 주파수가 324.75MHz일 때 동부 지역과 서부 지역의 회절 환경에서 표본 지점에 대한 전계강도 측정 데이터, Deygout 방법, 그리고 제안된 모델을 비교한 것이다. 측정 데이터는 정규분포를 적용하여 평균과 표준편차를 나타내었고, Deygout 방법은 자유공간 전계강도와 장애물에 대한 회절 손실을 적용하여 구한 전계강도와 측정치와의 오차를 나타내었다. 그리고 제안된 모델에서는 Deygout 방법과 회절손실 보정인자를 적용하여 구한 값과 측정치와의 오차를 표현하였다. 측정 데이터의 표준편차는 평균 0.53dB의 값을 보였고 표본 지점 D7에서 최대 2.21dB의 표준편차가 발생하였다. 측정치와 Deygout 방법간의 오차는 1.9dB에서 21.6dB의 범위를 가졌고, 측정치와 예측치간의 오차는 0.0dB에서 4.3dB의 범위를 보였다. 이는 전파 경로상의 인접 장애물과 산림 지역에서의 균열 분포에 따른 손실로 추측된다.

Table 22. Diffraction coefficients of principal and pseudo obstacles at Cheju Nat'l Univ.

Sample Point	Principal Obstacle Diffraction Coefficient	Pseudo Obstacle Diffraction Coefficient
U10	-5.1025	—
U11	-1.1645	-0.5111
U12	0.7607	-0.7631
U13	-0.3729	-0.0362
U14	-0.1073	-0.2248
U15	-4.3843	—

Table 22는 주파수가 1843.75MHz일 때 제주대학교의 회절 환경에서 전

파 경로상의 기준 장애물과 의사 장애물의 회절계수를 나타내었다. 표본 지점 U10과 U15는 전파 경로상의 장애물이 하나이기 때문에 보정 회절계수가 없으며, 나머지 표본 지점은 다중 장애물에 의한 보정 회절계수를 구하였다. 그리고 표본 지점에 대한 전계강도 측정 데이터, Deygout 해석 방법, 그리고 제안된 모델을 비교하여 Table 23에 표현하였다.

Table 23. Comparison with field strength at Cheju Nat'l Univ. in case of diffraction

Sample Point	Measured Data (dB $\mu$ V)		Deygout's Method (dB $\mu$ V)		Predicted Method (dB $\mu$ V)	
	Mean	Deviation	Value	Error	Value	Error
U10	41.1	1.00	41.4	0.3	41.4	0.3
U11	34.8	1.47	47.1	12.3	36.9	2.1
U12	37.0	1.31	51.9	14.9	39.6	2.6
U13	29.1	0.84	35.2	6.1	28.9	0.2
U14	32.3	0.90	37.9	5.6	30.0	2.3
U15	30.7	0.94	28.9	1.8	28.9	1.8

측정 데이터는 정규분포에 적용하여 평균과 표준편차를 구하였고 Deygout 방법의 예측치와 제안된 모델의 예측치는 주파수가 324.75MHz일 때의 예측 방법을 적용하여 구하였다. 측정 데이터의 표준편차는 평균 1.1dB의 값을 가졌고 1.47dB의 표준편차가 표본 지점 U11에서 발생하였다. 평균 측정치와 Deygout 방법간의 오차는 0.3dB에서 14.9dB의 범위를 가졌고, 예측 평균 값간의 오차는 0.2dB에서 2.6dB의 범위에서 발생하였으며 일부 표본 지점에서는 3dB 이상의 오차가 발생하였다.



### 3. 전계강도 예측모델의 시뮬레이션

본 논문에서는 전계강도 예측모델 알고리즘을 구성하였으며 이를 이용하여 전파의 불량지역을 효율적으로 분석할 수 있는 방법에 대하여 분석하였다. 알고리즘은 지형 데이터와 대지면의 환경 데이터를 이용하여 필요한 파라미터를 계산하고 전계강도 분포를 표현하도록 하였다. 전계강도 예측모델의 시뮬레이션 결과는 Fig. 41의 흐름도에 따라 고찰하였다.

흐름도에서 제원 입력과 송신 위치 선정은 Fig. 50과 Fig. 51에 보이는 것처럼 슬라이드바(slide bar)와 크로스커서(cross cursor) 형태의 마우스 포인터(mouse pointer)를 사용하여 데이터 입력을 할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 52는 임의의 한 수신 위치에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 결과는 Fig. 41의 흐름도에서 지형 데이터를 이용하여 지형 분포를 계산하고 예상 장애물의 찾기 과정을 거쳐 예측모델을 적용한 것이며 각 과정의 결과가 화면에 나타나도록 구성하였다. 결과 화면에서 송신 제원, 수신 제원, 그리고 송신 및 수신 지형 위치는 전파 환경을 분석할 수 있도록 표현되었다. 그리고 전파 경로와 지형 프로파일은 예상 장애물 찾기에 대한 결과와 이에 대응하는 예측모델을 적용한 결과이며 전계강도 예측치와 측정 데이터의 분포를 보인다.

Fig. 53, Fig. 54, Fig. 55는 송신 위치를 선정하였을 때 서비스 영역에 대한 전계강도를 나타낸 것으로 전계강도 계산은 모든 위치에 대하여 알고리즘의 전과정을 반복 수행하게 된다. Fig. 53은 최소 좌표 간격이 250m일 때 서부 지역에 대한 예측 전계강도를 계산한 결과이고 Fig. 54는 최소 좌표 간격이 25m일 때의 전계강도 분포이다. Fig. 55는 좌표 간격이 25m일 때 동부 지역에 대한 전계강도를 표현하였다. 전계강도의 분포는 최소 좌표간 간격이 좁을수록 세밀하게 나타나며 전파의 불량지역을 확인할 수 있다.

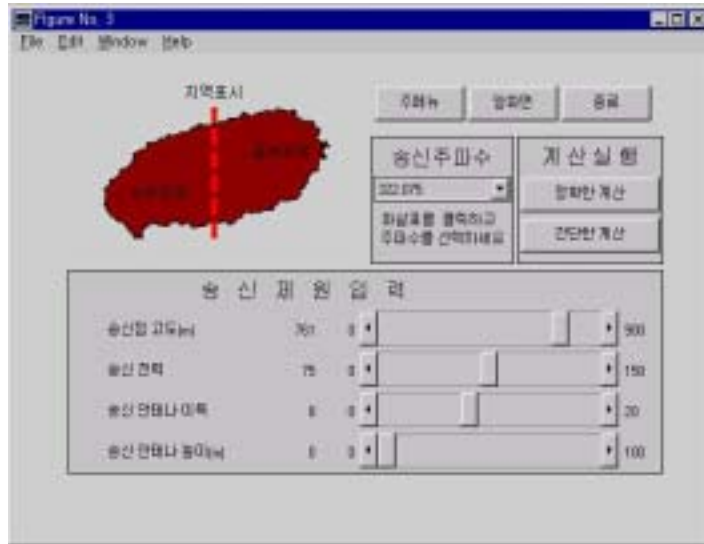


Fig. 50. Parameter input window

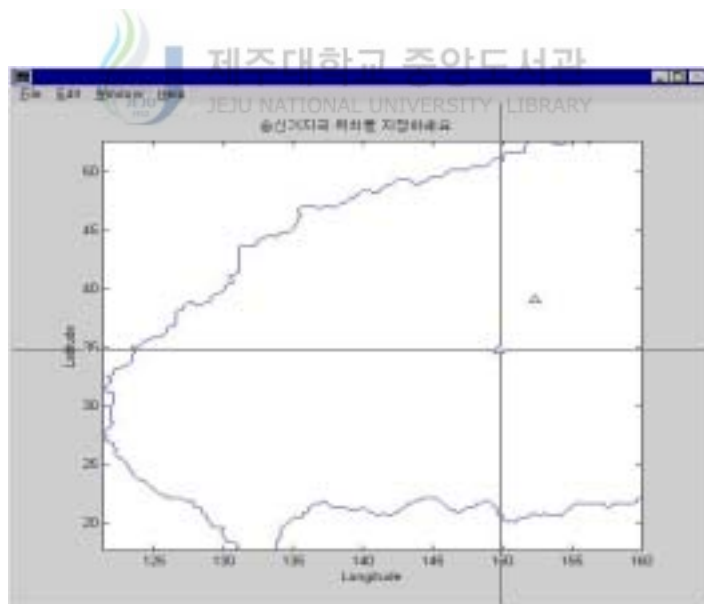


Fig. 51. Position selection window

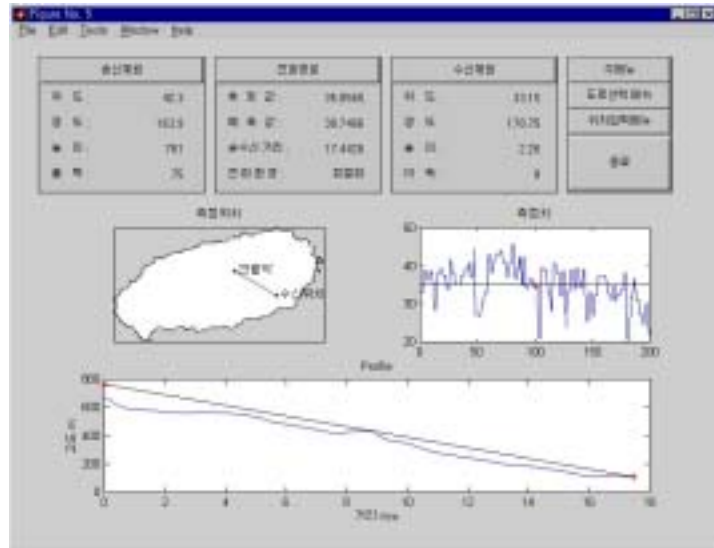


Fig. 52. Calculation result window at a sample point

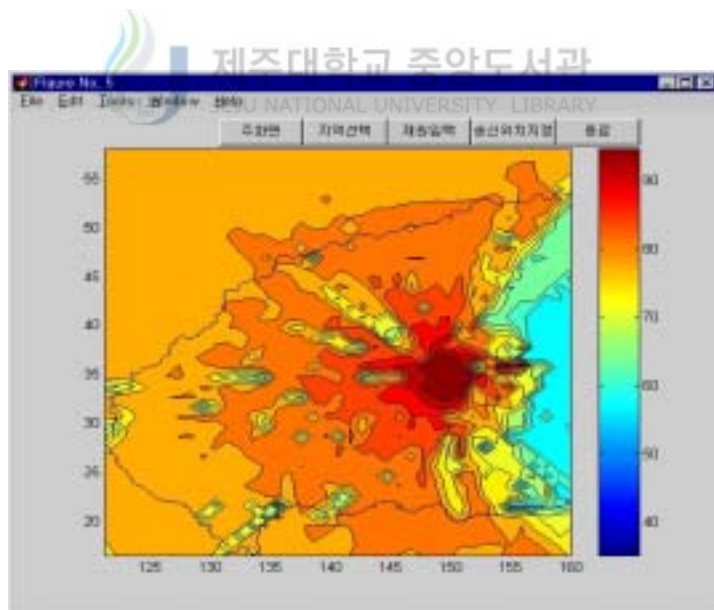


Fig. 53. Calculation result window in western area(250m)

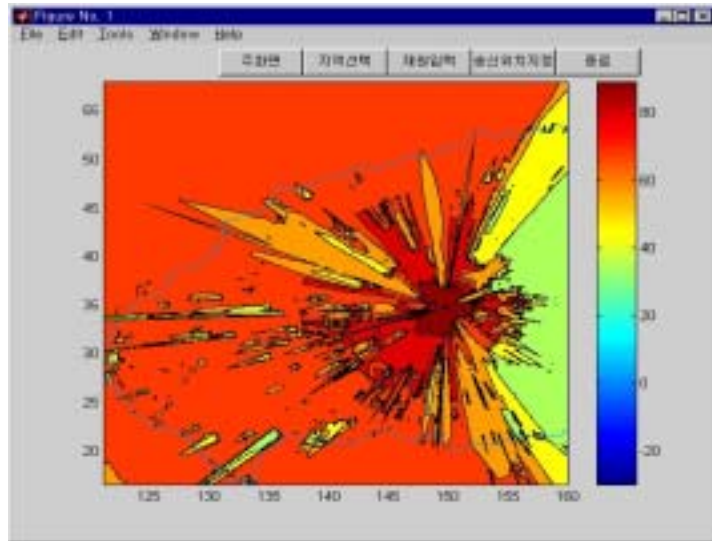


Fig. 54. Calculation result window in western area(25m)

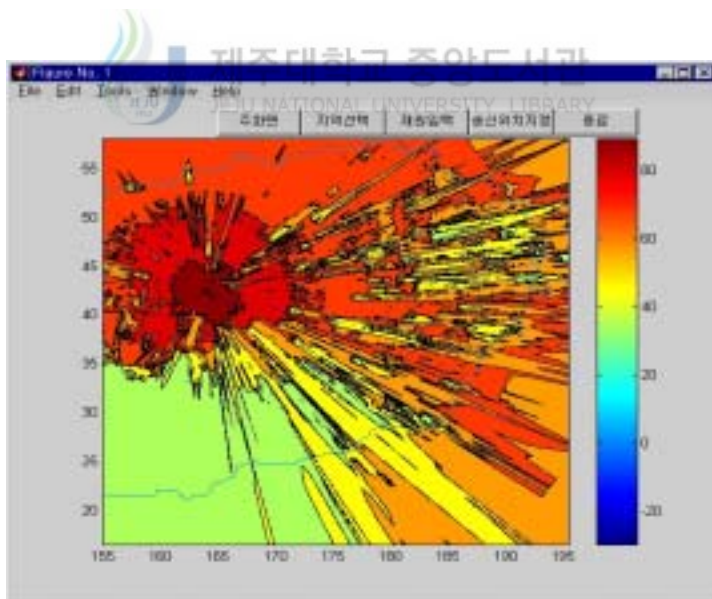


Fig. 55. Calculation result window in eastern area(25m)

## VI. 결 론

전자파 전파 환경에서 언덕과 나무와 같은 자연 지형이나 건물과 같은 인공 구조물은 부가적인 손실을 발생시키는 전파 경로상의 장애물이 되거나 다른 서비스 영역으로 전자파 전파를 차단하는 차폐물이 될 수 있다. 이와 같은 환경에서 고품질의 무선 서비스를 제공하기 위해서는 전자파 전파 현상에 대한 정확한 이해 및 분석이 반드시 뒷받침되어야 하며 새로운 형태의 무선통신 및 방송에서 전자파 전파에 대한 연구와 대책이 필수적이다.

본 논문에서는 다양한 환경에 대해 지형 특성을 분석하여 수신 전계강도를 정확하게 예측하기 위한 파라미터를 산출하였다. 또한 지형 정보를 이용한 전파 특성 분석으로 보다 정확한 전자파 전파 특성 예측모델을 제시하였다. 지형 분포와 대지면의 환경 분류에 대한 정보는 전파 특성 분석에 있어 효율성을 증대시킬 수 있었으며 예측모델에 대한 알고리즘을 구성하여 전파 자원의 효율적인 사용 방법을 제시하였다.

무선 링크의 가시거리 환경에서 반사면의 전기적 특성과 대지면의 환경 특성은 수신 전계강도를 변화시키는 파라미터이다. 반사면의 전기적 특성을 얻기 위해 안테나의 편파 특성을 이용하여 반사계수와 직접파와 반사파를 포함하는 수신 전력식을 이용하여 원의 방정식을 유도하였고, 반파장 다이폴 안테나를 사용하여 편파 특성에 따른 전계강도를 측정하였다. 측정치를 이론식에 적용하여 매질의 전기적 특성을 구하였다. 그 결과 본 연구에서 제시한 표본 매질의 전기적 특성은 유전상수의 경우 일반적인 대지의 유전상수보다 작았으며 도전율은 큰 값을 가졌다. 한편 대지면의 환경 특성은 위성사진으로 구분된 자연 환경을 전파 환경 조건에 맞는 환경으로 구분하였으며 그 특성에 의

한 영향은 측정 데이터를 정량적으로 분석하여 반사계수의 범위로 정하였다. 그 결과 산림 환경과 초지 환경의 반사계수는 각각 건조한 대지와 평균 대지의 전기적 특성과 유사하였다. 가시거리 예측모델은 송신점과 수신점 사이의 지형 분포에 의해 많은 영향을 받기 때문에 전파 환경을 분석할 수 있는 지형 기울기를 제시하였다. 지형 기울기에 의해 형성된 가상 평면은 실제 지형을 적합하게 표현할 수 있었으며 이 환경에서의 가시거리 예측모델에 의한 예측치와 측정치를 비교하여 적합성을 확인하였다. 또한 회절 환경에서 전파 특성은 장애물 분포에 대한 구조적 해석 방법을 제주 지형에 적용하여 적합한 방법을 찾았으며 측정치와의 오차에 대한 보정인자는 분석 방법에서 전파 경로상의 모든 장애물의 회절 높이를 분석하여 의사 장애물을 가정하였고 의사 장애물의 회절 높이에 대한 보정 손실을 구하였다. 장애물에 대한 해석 방법과 회절손실 보정인자를 적용하여 제주의 지형 특성에 적합한 회절손실 예측모델을 제시하였다. 지형 데이터와 대지면의 환경 데이터를 구성하여 전계강도 예측모델에 대한 알고리즘을 구성하였으며 시뮬레이션 결과는 제주 지역에 대하여 이동 측정 및 고정 측정을 통한 측정치와의 일치성을 보였다.

본 연구에서 지형 특성을 고려하여 제시한 전자파 전파 예측모델은 전자파 전파 환경에 대해 보다 정확한 예측 및 무선 시스템의 설계 방향을 제공할 수 있으며 스펙트럼 관리, EMI 관리 규정, 그리고 새로운 형태의 전파 연구에 기본적으로 갖추어야 할 연구분야 등에 적용할 수 있다.

## 참고문헌

- Anderson, H.R., 1997, New 2D physical EM propagation model selected, *IEEE on Vehicular Technology Society News*, vol.44, no.3, pp.15~22.
- Barsis, A.P., 1971, Radio wave propagation over irregular terrain in the 76 to 9200MHz frequency range, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.20, no.2, pp.41~62.
- Barsis, A.P., 1973, Determination of service area for VHF/UHF land mobile and broadcast operations over irregular terrain, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.22, no.2, pp.25~29.
- Bullington, K., 1977, Radio propagation for vehicular communications, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.26, no.4, pp.295~308.
- CCIR Recommendation, 1978, VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30MHz to 1000MHz, vol.5, XIV Plenary Assembly Kyoto, Japan.
- Deygout, J., 1966, Multiple knife-edge diffraction of microwaves, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.14, no.4, pp.480~489.
- Egli, J.J., 1957, Radio propagation above 40Mc over irregular terrain, *Proc. IRE*, vol.45, no.10, pp.1383~1391.
- Epstein, J., D.W. Peterson, 1953, An experimental study of wave propagation at 850Mc/s, *Proc. IRE*, vol.41, pp.595~611.
- Griffiths, J., 1987, Radio wave propagation and antenna, an

- introduction, Prentice-Hall.
- Hata, M., 1980, Empirical formula for propagation loss in land mobile services, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.29, no.3, pp.317~325.
  - Hess, G.C., 1993, Land-mobile radio system engineering, Artech House, pp.7~132.
  - 하덕호, 1998, 차세대 이동 통신에서의 광대역 전파특성 연구: 실내에서의 광대역 전파특성 측정, 한국전자과학회논문집, vol.9, no.2, pp.265~277.
  - 홍성욱, 김홍수, 1997, 제주도 위성사진을 이용한 토지 이용지역의 반사계수 비교, 한국전자과학회 학술대회논문집, pp.187~191.
  - 홍성욱, 김홍수, 1997, 제주도 위성사진에 의한 지형 분포에 따른 반사계수 비교, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, vol.8, no.3, pp.21~27.
  - 홍성욱, 김홍수, 1998, 제주의 지형 및 토지이용 데이터를 이용한 전계강도 예측 프로그램, 한국전자과학회논문집, vol.9, no.6, pp.824~832.
  - 홍성욱, 김홍수, 1998, 지형 데이터에 의한 전파경로 분별과 신호세기의 분포 계산, 한국통신학회 학술대회논문집, vol.17, no.2, pp.765~768.
  - 後藤惠之輔, 湯藤義文, 七條哲彰, 武政剛弘, 1990, 韓國濟州島の土地利用分類への海洋観測衛星MOS-1データの適用, 九州大學校型計算機センター-計算機科學研究報告 第7号, pp.19~28.
  - 허정, 신성현, 한명우, 이창은, 최홍주, 1998, 축소 실험 모형을 이용한 다중경로 페이딩의 공간분포 특성 분석, 한국전자과학회 논문집, vol.9, no.4, pp.450~461.
  - IEEE Vehicular Technology Society Committee on Radio Propagation, 1988, Coverage prediction for mobile radio systems operation in the



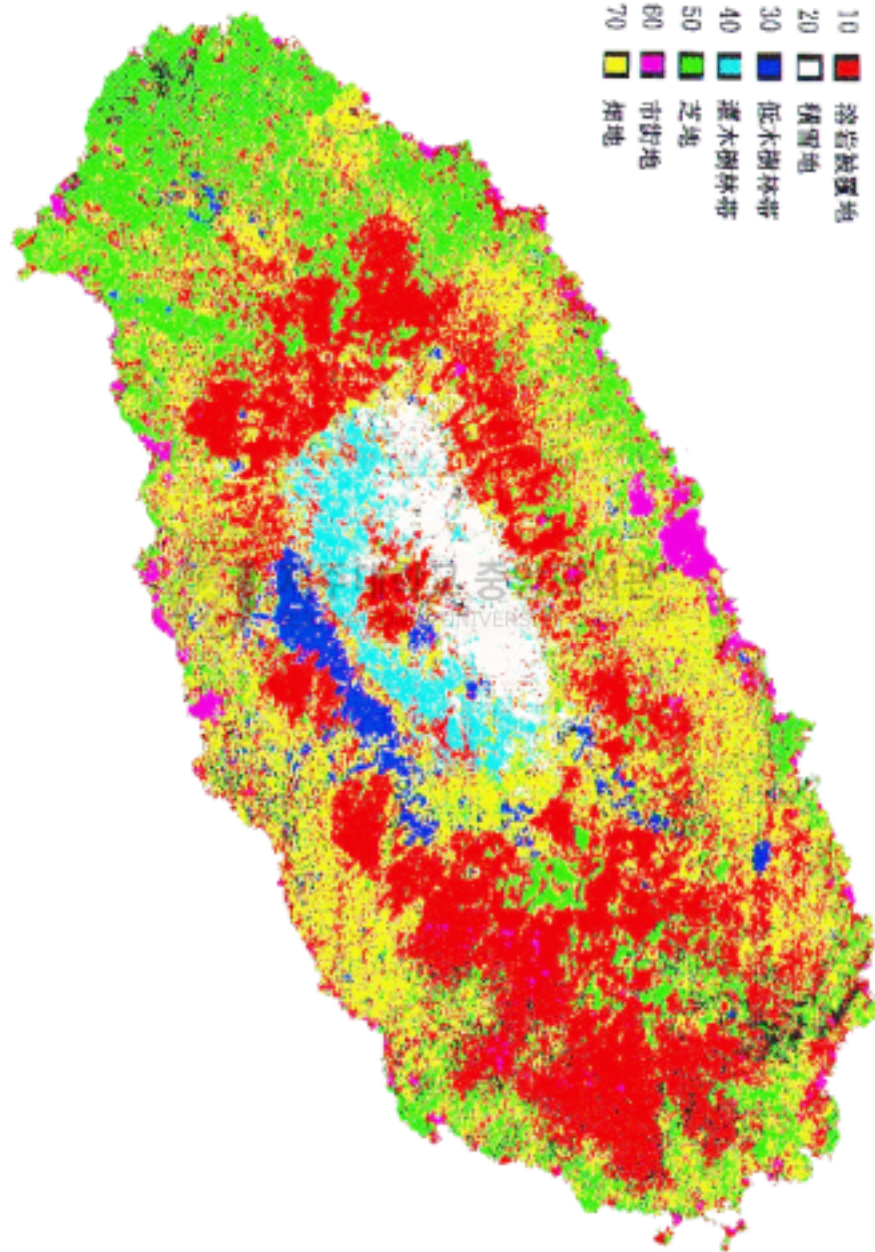
- 800/900 MHz frequency range, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.37, no.1, pp.1~70.
- Jakes, W.C., 1974, Microwave mobile communications, John Wiley & Sons, pp.79~132.
- Jordan, E.C., K.G. Balmain, 1968, Electromagnetic waves and radiating systems, Prentice-Hall, pp.498~503.
- Kurner, T., D.J. Cichon, and W. Wiesbeck, 1993, Concepts and results for 3D digital terrain-based wave propagation models: An overview, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.11, no.7, pp.1002~1012.
- Kurner, T., D.J. Cichon, and W. Wiesbeck, 1997, The influence of land usage on UHF wave propagation in the receiver near range, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.46, no.3, pp.739~747.
- Landron, O., M.J. Feuerstein, and T.S. Rappaport, 1993, In situ microwave reflection coefficient measurements for smooth and rough exterior wall surfaces, *IEEE Trans. Vehicular Technology Conference*, Secaucus, NJ, pp.77~80.
- Landron, O., M.J. Feuerstein, and T.S. Rappaport, 1996, A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.44, no.3, pp.341~351.
- Lee, W.C.Y., 1975, Studies of base-station antenna height effects on mobile radio, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.24, no.4, pp. 252~260.

- Lee, W.C.Y., 1982, Mobile communications engineering, McGraw-Hill, pp.15~143.
- Lee, W.C.Y., 1995, Mobile cellular telecommunications : Analog and digital systems 2nd ed., McGraw-Hill, pp.103~156.
- 이권익, 홍성욱, 김홍수, 1996, 제주 서부지역의 지형특성을 고려한 전파전파 예측, 한국통신학회 학술대회논문집, vol.15, no.1, pp.192~195.
- 이권익, 홍성욱, 강부식, 김홍수, 1996, 濟州 西部地域의 電波 傳播 豫測 모델, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, vol.7, no.2, pp.49~56.
- 이상설, 1997, 안테나 및 전자파전파, 형설출판사.
- 이형수, 조삼모, 정진욱, 1995, 무선호출 주파수 전파 환경 측정 및 외국 환경과의 비교, 전자과학회지, vol.6, no.3, pp.15~23.
- Maclean, T.S.M., Z. Wu, 1993, Radio wave propagation over ground, Chapman & Hall.
- Okumura, Y., E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, 1968, Field strength and its variability in VHF and UHF land Mobile radio service, Rev. Elec. Communication Lab., vol. 16, pp.825~873.
- Parsons, D., 1992, The mobile radio propagation channel, John Wiley & Sons.
- Rana, D., A.R. Webster, and M. Sylvain, 1995, Surface reflection at low-angle propagation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.43, no.7, pp.639~652.
- Rizk, K., J.F. Wagen, and F. Gardiol, 1997, Two-dimensional ray tracing modeling for propagation prediction in microcellular environment, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.46, no.2, pp.

508~517.

- Shepherd, N.H., 1977, Radio wave loss deviation and shadow loss at 900MHz, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.26, no.4, pp. 309~313.
- Shibuya, S., 1987, A basic atlas of radio wave propagation, John Wiley & Sons.
- Tewari, R.K., S. Swarup, and M.N. Roy, 1990, Radio wave propagation through rain forests of India, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.38, no.4, pp.433~449.
- Vogler, L.E., 1982, An attenuation function for multiple knife-edge diffraction, *Radio Science*, vol.17, no.6, pp.1541~1546.
- Xia, H.H., H.L. Bertoni, L.R. Maciel, A. Lindsay-Stewart, and R. Rowe, 1993, Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.41, no.10, pp.1439~1447.

# 부 록 I . 제주의 위성사진



## 부 록 II. 알고리즘에 대한 프로그램

### ◎ 제원 입력 및 위치 선정

```
%FileName:simp
fig3=figure('Position',[10,10,640,550],...
            'NumberTitle','off');
contour(ixx,iyy,init,1),axis image,axis equal;
plot(orm(:,1),orm(:,2),'b^');
title('송신기지국 위치를 지정하세요');

%input point
ylabel('Latitude')
xlabel('Longitude')
hold on
[px,py]=ginput(1);
close(4);
```



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

### ◎ 지형 데이터 분석

```
%FileName:profl
%Find zii index
for ii=1:400
    xe=(lat1-x(ii)).^2;
    xl=min(find(xe==min(xe)));
    ye=(lon1-y(ii)).^2;
    yl=min(find(ye==min(ye)));
    xe=lat1(xl)-x(ii);
```

```

ye=lon1(yl)-y(ii);
if xe>0&ye>0
    if (ye)>(1-ye)
        z1=ye*(zii(yl-1,xl-1)+zii(yl-1,xl));
        z2=(1-(ye))*(zii(yl,xl-1)+zii(yl,xl));
    else
        z1=(1-ye)*(zii(yl-1,xl-1)+zii(yl-1,xl));
        z2=ye*(zii(yl,xl-1)+zii(yl,xl));
    end
    if abs(xe)>(1-abs(xe))
        z3=xe*(zii(yl-1,xl-1)+zii(yl,xl-1));
        z4=(1-xe)*(zii(yl-1,xl)+zii(yl,xl));
    else
        z3=(1-xe)*(zii(yl-1,xl-1)+zii(yl,xl-1));
        z4=xe*(zii(yl-1,xl)+zii(yl,xl));
    end
end
.....
end

```



### ◎ 장애물 위치 파악

```

%FileName:propa_main
%Knife edge
di=atan((hegt(2:ll-1)-hegt(1:ll-2))/dis(2));
di=find(di<=0);
ddi=di(2:length(di))-di(1:length(di)-1);
di=di(2:length(di));
ddi=find(ddi>1);
di=di(ddi);

```

◎ 예상 장애물에 대한 회절 계수 계산

```
%FileName:propa_main
%Path Angle
theta=atan((hegt(1)-hegt(II)-ant)/dis(II));
dise=flipr(dis(2:II-1));
he2=dise*tan(theta)+hegt(II)+ant;
r1=1./dis(di);
r2=1./(dis(II)-dis(di));
ro=sqrt(lambda./(r1+r2));
hee=hegt(di)-he2(di-1);
vv=-hee./ro;
```

◎ 전파 환경 구분

```
%FileName:propa_main
%Find obstacle condition
vi=find(vo<=1.22);
dci=length(vo(vi));
if dci==0
    %Direct & Angle
    .....
else
    %Diffraction
    .....
end
```

◎ 가시거리 환경에서의 전계강도 계산

```
%FileName:propa_main
%Direct & Angle
tta=atan((hegt(1:II-1)-hegt(2:II))./(dis(2:II)-dis(1:II-1)));
```

```

mini=tta>(mean(tta)-2*std(tta));
maxi=tta<(mean(tta)+2*std(tta));
tta=mini.*maxi.*tta;
kl=find(tta);
tta=tta(kl);
tta=median(tta);
if rd_gr==0
    gamma1=0.45:0.01:0.65;phi=171*pi/180;
else
    gamma=0.35:0.01:0.45;phi=176*pi/180;
end

```

#### ◎ 장애물에 대한 해석 방법

```

%FileName:propa_main
% Error & V
r1=1./(dis(di)/cos(theta));
r2=1./((dis(l1)-dis(di))/cos(theta));
ro=sqrt(lamda./(2*(r1+r2)));
hee=hegt(di)-he2(di-1);
%Diffraction coefficient
vva=min(-hee./ro);
%Correction factor
ihee=-hee;
smhe=sum(ihee);
%Maxmum edge
mxh=find(hee==max(hee));
mx=di(mxh);
%Path angle--Front
sita=atan((hegt(1)-hegt(mx))/dis(mx));
he2=(dis(mx)-dis(di(1:mxh-1)))*tan(sita)+hegt(mx);
hee=hegt(di(1:mxh-1))-he2;

```



```

r1=1./((dis(di(1:mxh-1)))/cos(sita));
r2=1./((dis(mx)-dis(di(1:mxh-1)))/cos(sita));
ro=sqrt(lamda./(2*(r1+r2)));
vzb=-hee./ro;
%Path angle--back
sita=atan((hegt(mx)-hegt(ll)-ant)/(dis(ll)-dis(mx)));
he2=(dis(ll)-dis(di(mxh+1:la)))*tan(sita)+hegt(ll)+ant;
hee=hegt(di(mxh+1:la))-he2;
r1=1./((dis(di(mxh+1:la))-dis(di(mxh)))/cos(sita));
r2=1./((dis(ll)-dis(di(mxh+1:la)))/cos(sita));
ro=sqrt(lamda./(2*(r1+r2)));
vzc=-hee./ro;
vva=sort([vva vzb vzc]);
%correction factor calculation

```



### 부 록 III. 제주대학교 지형에 대한 등고선도

