

---

碩士學位論文

S-밴드 레이다에서의 덕트와 클러터  
現象에 관한 研究

濟州大學校 大學院

通信工學科



1993年 6月

S-밴드 레이다에서의 덕트와 클러터  
現象에 관한 研究

指導教授 張 宰 成

高 興 眞

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

1993年 6月

高 興 眞의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 林 載 允

委 員 金 興 洙

委 員 張 宰 成



濟州大學校 大學院

1993年 6月

---

# A Study on the Phenomena of Duct and Clutter in a S-Band Radar

Heung-Jin Ko

(Supervised by professor Jae-Seong Chang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING



DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1993. 6.

# 목 차

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Abstract .....                    | 1  |
| I. 서론 .....                       | 2  |
| II. 클러터(Clutter) 특성 .....         | 4  |
| 2.1 지표면의 영향 .....                 | 4  |
| 2.2 레이다 클러터 .....                 | 6  |
| 2.3 표면 클러터의 레이다 방정식 .....         | 7  |
| 2.4 표면 클러터 대 잡음 .....             | 11 |
| 2.5 지면 및 해면 클러터 특성 .....          | 15 |
| III. 덕트(Duct)의 특성 .....           | 17 |
| 3.1 대류권 전파 .....                  | 17 |
| 3.2 대류권 내에서의 대기의 굴절을 .....        | 18 |
| 3.3 수정 굴절을 .....                  | 20 |
| 3.4 라디오 덕트와 초굴절 .....             | 22 |
| 3.5 라디오 덕트 발생 확률 .....            | 26 |
| 3.6 덕트 현상에 의한 레이다 수신전력 .....      | 28 |
| 3.7 덕트의 발생 원인 .....               | 31 |
| 3.8 대기상태가 레이다 전파 전파에 미치는 영향 ..... | 33 |

---

|                 |    |
|-----------------|----|
| IV. 계산 결과 ..... | 35 |
| V. 결 론 .....    | 45 |
| 참고문헌 .....      | 47 |



## Abstract

The radio duct properties and clutter were clarified to estimate propagation characteristics for the radar system. Clutter generated by radar echoes make the detection of wanted target difficult. Clutter limit the sensitivity of the radar receiver and the determination of range performance.

The phenomena of the radio duct and clutter in a S-band radar were studied by analytic model. This model satisfies Sasaki and William's equations, that applied into the meteorological data and also the distribution of refractive index at atmosphere.

When the duct occurred at atmosphere, the received power was analyzed and the probability and the cross section of clutter(land,sea) calculated. The calculated probability of radio duct are 19 percent in elevated duct and 78 percent in surface duct. Signal to noise ratio decreased as radar cross section became small and detection range became long. The development program will be used to analyze the phenomena of the anomalous propagation.

# I. 서론

電磁波의 傳播현상을 연구하는 목적은 레이다에서 산란 물체의 형태 및 크기를 분석하거나, 안테나 설계등을 이론적으로 해석하여 電磁波의 성능을 극대화하는 것이며, 이러한 電磁波 이용으로 발생하는 전자기기의 상호현상인 EMI (Electro Magnetic Interference), 인체에 미치는 電磁波 영향등을 고려하여 효율적인 電波이용을 제안하는 것이다.

레이다에서 주로 사용되는 주파수 범위는 수백 MHz~수십 GHz이상이므로 지상에서의 電磁波(Electromagnetic Wave) 傳播현상과 대기권에서의 電磁波 傳播현상을 모두 고려하여야 하고, 특히 도서지방에서는 해면에서의 電磁波 傳播현상등을 고려해야 한다.

기상조건으로 인한 電磁波 장애현상은 S-band 레이다인 경우에 기상조건에 따라 電波는 대기상의 밀도 변경선을 통과하면서 여러 각도로 회절하여 탐지 장애현상이 4월~10월중에 나타나고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기상 관측 레이다(제주, 고산)에서 감지되는 기상조건에 따라 항공 관제용 레이다에서의 電磁波 형태를 분석하고, 지표에서의 傳播현상, 대기권에서의 傳播현상, 해면에서의 傳播현상등을 고려하여 이들 장애요인을 규명한다.

電磁波의 傳播현상은 다음과 같이 두가지로 분류할 수 있다. 첫번째로는 지표에 의한 영향으로 만들어 지는 편파현상이고(Shigrkazu Shibuya, 1987), 두번째로는 電磁波의 굴절현상으로 인한 라디오 덕트(O.Sasaki and T.Akiyama, 1982)에 의한 것과 대기중 마이크로파의 감쇄 등으로 대기권에서 이루어지는

감쇄현상이다. (F. E. Nathanson, 1991) 특히, 레이다 電波 傳播에 영향을 주는 요인은 대기의 기온 역전 현상 때문에 생기는 덕트(duct)와 불필요한 레이다 에코(echo)로써 발생하는 클러터(clutter)현상이 있다.

덕트와 클러터에 대한 대표적인 연구 내용들은 대기의 굴절을 분포의 형태와 기상자료를 이용하여 덕트 발생 확률을 제시(O. Sasaki, 1982) 하였고 MTI 시스템에서의 해면 클러터 제거 한계(J. Patrick Reilly, 1990)와 고 분해능 레이다를 이용한 낮은 grazing 각에서 측정된 Non-Rayleigh 해면 클러터의 레이다 특성에 대한 연구등이 있다. (G. V. Trunk, 1992)

본 논문에서는 O. Sasaki와 William A. Skillman의 연구를 토대로 항공 관제 레이다인 S-band 에서 발생하는 덕트 현상과 클러터 현상을 해석하고 기상 변화에 따른 電波 傳播 특성을 고찰한다. 또한 위에서 서술한 傳播현상에 대한 이론적 배경식을 이용하여 기상 레이다 및 측후소에서 수집한 습도, 기압, 기온 등의 기상자료를 대입하여 이론적인 傳播현상에 대한 형태를 분석하고, 항공 관제용 레이다로부터 측정된 傳播현상과 비교 검토하여 이론치와 측정치의 차이를 구하고, 목표물 미탐지 원인을 분석 연구한다.

본 논문의 각 장의 내용을 요약하면 1장은 본 연구의 배경에 대하여 설명하며, 2장은 레이다의 클러터 특성을 서술하고, 3장에서는 대기의 덕트현상 및 電波 傳播 현상을 연구한다. 4장에서는 2장, 3장의 이론을 근거로 측정된 기상 자료 및 S-band 레이다의 제원을 사용하여 덕트 및 클러터 현상에 대하여 계산하고, 5장에서는 4장의 결과를 토대로 결론을 서술 한다.



## II. 클러터(Clutter) 특성

### 2.1 지표면의 영향

바다나 육지를 포함하고 있는 지표면은 레이다 성능에 많은 영향을 미친다. 지표면에 의한 영향은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 하나는 전파효과이고 또 하나는 클러터현상이다. 표면이 매끄러운 경우나 또는 파의 입사각이 수직에 가까울수록 전방산란이 많이 일어나고 후방산란은 적게 일어난다. 반면 표면이 거친 경우에는 반대 현상이 발생된다. 이때 표면의 거친 정도의 기준은 Rayleigh의 판별식에 의해 분류된다.

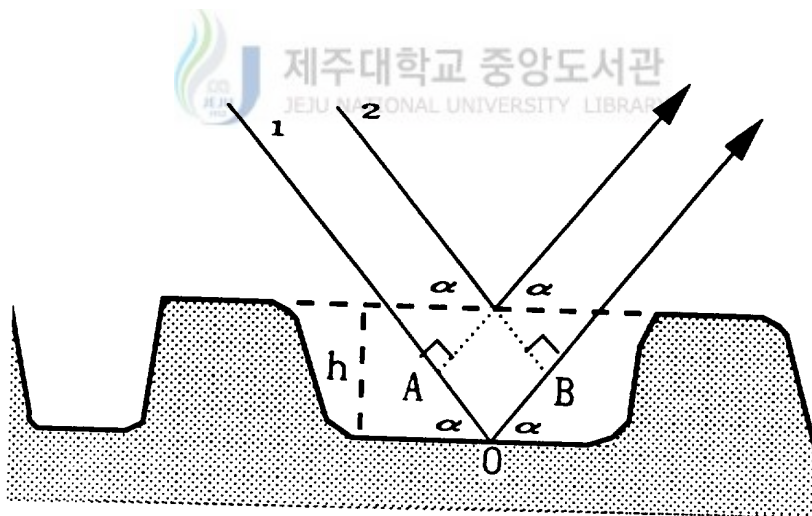


Fig.1 Rough surface reflection

Fig.1 에서 전원으로부터 수신기로 전파되는 두개의 경로를 나타내고 있다. 이들을 평행 광선으로 가정하고 이 광선들은 높이 h를 갖는 거친 표면에 의해 반사되는 것으로 한다. 표면의 아래쪽에서 반사되는 경로를 "1"이라 하고 표면의 높은쪽에서 반사되는 경로를 "2"라 한다.

경로1은 경로2에 비해 AOB만큼 더 길다. 이것을 다음식으로 쓸 수 있다.

$$\Delta R = AO + OB = 2h \sin\alpha \quad (1)$$

이 여분의 경로가 위상변화에 미치는 영향은 다음과 같다.

$$\Delta\Phi = \Delta R \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin\alpha \quad (2)$$

$\Delta\Phi$  의 값이 매우 작거나 0 이면 표면은 매끄러운 것으로 간주된다. 또한 위상 변화가  $\pi$ 에 가까워지면 null이 발생되어 두 광선은 서로 상쇄되어 없어진다. 식(2)로 부터 표면의 매끄럽고 거침은  $\Delta\Phi = \pi/2$ 에 의해 분류된다. 이것으로부터 매끄러운 표면은 다음과 같은 부등식에 의해 분류되어진다.

$$\frac{4\pi h}{\lambda} \sin\alpha < \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

즉,

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin\alpha} \quad (4)$$

인경우 매끄러운 표면으로 간주한다. Grazing각  $\alpha$ 가 작은 경우 h는 매우 큰 값을 갖게 된다. 즉  $\alpha$ 가 작으면 거의 모든 표면은 매끄러운 것으로 간주된다.

## 2.2 레이다 클러터

클러터는 원하지 않는 레이다 에코(echo)이다. 이러한 에코가 레이다의 출력을 혼란시키고, 목표물을 탐지하는데 어려움을 준다. 원하지 않는 에코인 클러터는 비행물체를 탐지하기 위한 레이다에서 육지, 바다, 비, 새, 곤충의 무리등에 의해 반사 되어지는 전파이다. 이러한 에코는 맑은 대기에서도 대기의 변동에 의해 생길뿐만 아니라 이온화된 대기에서도 발생된다. 일반적으로 클러터는 공간적으로 넓게 분포되어 있으며 이것은 레이다의 분해능보다 큰 크기를 갖는다. 클러터가 너무 강하면 레이다 수신기의 감도에 영향을 주고, 거리측정에 영향을 미친다. 이런 환경에서 최적의 레이다 시스템을 설계하는 것은 잡음의 영향을 받는 경우보다 훨씬 어렵다. 지면, 바다, 비, 새등의 여러가지 물체에 의해 생기는 클러터는 항공기를 탐지함에 있어 원하지 않는 신호이다. 구름에 의한 반사는 비행물체를 탐지하는 레이다에는 혼란을 줄 수 있으나, 기상관측 레이다에서는 넓은 범위에 걸쳐 비가 올 확률을 얻기 위해 매우 중요하다. 지면에 의한 반사는 대부분 레이다의 성능저하를 가져오지만 지형 탐지 레이다에서는 유용하게 응용된다. 이와 같이 어떤 물체에 의해 반사되는 전파는 유용하게 쓰이거나 혹은 클러터로 불필요한 전파가 되기도 한다. 지표면이나 바다에 의해 발생하는 에코를 표면 클러터라 하고, 비나 대기현상에 의해 발생하는 것을 체적 클러터라 한다. 이러한 분포 특성때문에 클러터에 의한 후방산란 에코를 측정하기 위해 일반 목표물에 적용하는 레이다 단면적 (Radar cross section)을 수정하여 RCS밀도로 표현한다. 단위 면적당 표면 클러터를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma^{\circ} = \sigma_c / A_c \quad (5)$$

여기서  $\sigma_c$  는 면적  $A_c$ 에 대한 RCS이다. 표면 클러터의 분포를 표현하기 위해 식(5)를 사용하는 이유는 면적  $A_c$ 에 무관하다는 것이다. 단위체적에 대한 체적 클러터 혹은 반사율을 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \sigma_c / V_c \quad (6)$$

여기서  $\sigma_c$  는 체적  $V_c$ 에 대한 RCS이다.

### 2.3 표면 클러터의 레이더 방정식

표면 클러터를 설명 하기위해 grazing각  $\alpha$ 로 표면에 비춰지는 레이더 클러터를 Fig.2 에 나타내었다.

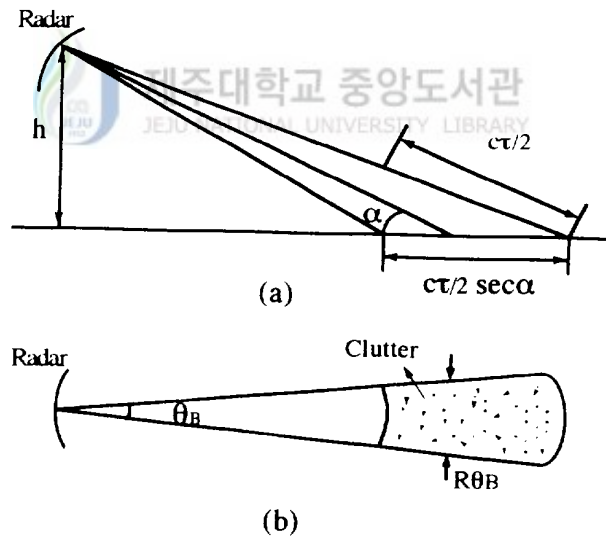


Fig.2 Geometry of surface clutter

면적  $A_c$ 는 방위각  $\theta_B$ 에 의해 결정된다고 보며 길이는 수직(elevation) 빔 폭 보다 레이다 펄스폭  $\tau$ 에 의한 영향을 받는 것으로 간주한다. 클러터에 의해 수신되는 전력은 다음과 같다.

$$P_c = \frac{P_t \cdot G \cdot A_e \cdot \sigma_c}{(4\pi)^2 \cdot R^4} \quad (7)$$

여기서  $P_t$  : 전송 전력

$G$  : 안테나 이득

$A_e$  : 안테나 유효 개구 면적

$R$  : 거리

$\sigma_c$  : 클러터 단면적

클러터 단면적은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_c = \sigma^\circ A_c = \sigma^\circ R \theta_B (c\tau/2) \sec \alpha \quad (8)$$

여기서  $c$ 는 전파속도이다. 식(8)을 식(7)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$P_c = \frac{P_t \cdot G \cdot A_e \cdot \sigma^\circ \theta_B (c\tau/2) \sec \alpha}{(4\pi)^2 \cdot R^3} \quad (9)$$

목표물이 점으로 나타나는 경우 수신전력은 거리의 4승에 반비례하는 반면 표면 클러터에 의한 에코는 거리의 3승에 반비례하고 있다. 한편 단면적  $\sigma_t$ 를 갖는 목표물로부터 되돌아 오는 신호세기  $P_s$ 는 다음과 같다.

$$P_s = \frac{P_t \cdot G \cdot A_e \cdot \sigma_t}{(4\pi)^2 \cdot R^4} \quad (10)$$

grazing각도가 작을때 표면 클러터가 있는 경우 목표물의 신호대 클러터비는 식(9), 식(10)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{P_s}{P_c} = \frac{\sigma_t}{\sigma^\circ R \theta_B (c\tau/2) \sec \alpha} \quad (11)$$

최소 신호대 클러터비를  $(P_s/P_c)_{\min}$ 라 하고, 최대거리를  $R_{\max}$ 라하면  $R_{\max}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{\sigma_t}{(P_s/P_c)_{\min} \sigma^\circ \theta_B (c\tau/2) \sec \alpha} \quad (12)$$

이 식에서 클러터 세기  $P_c$ 는 수신되는 잡음의 세기보다 강한 것으로 가정하였다. 이식은 잡음만 있는 경우에 대한 레이더의 수식과는 완전히 다른 것이다. 일반적인 수식에서는 거리의 4승으로 나타나지만, 식(12)에서는 거리의 1승으로 나타나 있다. 이것은 잡음만 있는 경우 보다 클러터만 있는 경우가 최대거리의 변화가 많다는 것을 알 수 있다. 또한 수식내에 전송전력항이 나타나 있지 않아 전송전력이 증가함에 따라 목표물에 의한 신호도 증가하지만 그에 따라 클러터의 영향도 강해진다. 식(12)를 사용하기 위해서는 전송전력의 세기를 잡음의 세기보다 클러터의 세기가 훨씬 강한 범위에서 정한다. 식(12)에서 방위각  $\theta_B$ 에 대한 항은 있으나, 안테나 이득  $G$ 는 포함되어 있지 않다. 펄스폭이 좁을 수록 거리는 증가하며 잡음이 있을때 목표물을 탐지하는 레이더의 경우와 반대 현상이다. 신호대 잡음비를 증가시키기 위해서는 펄스폭을 길게 할 필요가 있지만 클러터가 우세한 경우 펄스폭이 길면 신호대 클러터비가 감소한다.

다음으로 파가 거의 수직으로 입사하는 경우 표면 클러터를 살펴본다. 레이더에 의해 비춰지는 클러터 면적은 안테나 빔폭  $\theta_B$ 와  $\phi_B$ 에 의해 결정된다.

식(5)에서 클러터 면적  $A_c$ 는  $(\pi/4)R\theta_B \cdot R\phi_B \sin \alpha$ 로 주어진다. 여기서  $(\pi/4)$ 는 면적이 타원이기 때문에 생긴 상수이다. 식(7)에  $A_c$ 와  $G=\pi^2/\theta_B \phi_B$ 를 대입하여 클러터 레이더 방정식을 다시 쓰면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$P_c = \pi P_t A_e \sigma^\circ / 64R^2 \sin \alpha \quad (13)$$

이식에서 클러터 전력은 거리의 자승에 반비례한다. Fig. 3은 레이더에서 전파

가 지표면에 비취질때 나타나는 각을 표시하였다. 입사각은 전파의 진행방향과 표면의 법선성분이 이루는 각이고, grazing각은 표면의 접선성분과 이루는 각이다. depression각은 레이다에서 수평면과 이루는 각을 나타내고 지표면은 평평한 것으로 간주한다. 이때 depression각과 grazing각은 같다. 만약 지구표면의 곡률을 간주하면 이 두 각은 같지 않게 된다. 레이다를 고도계로서 지표면에 수직 입사되어 반사되는 효과를 고려할때는 입사각을 사용한다. 그 외의 레이다를 이용하는 대부분의 분야에서는 grazing각도를 사용한다.

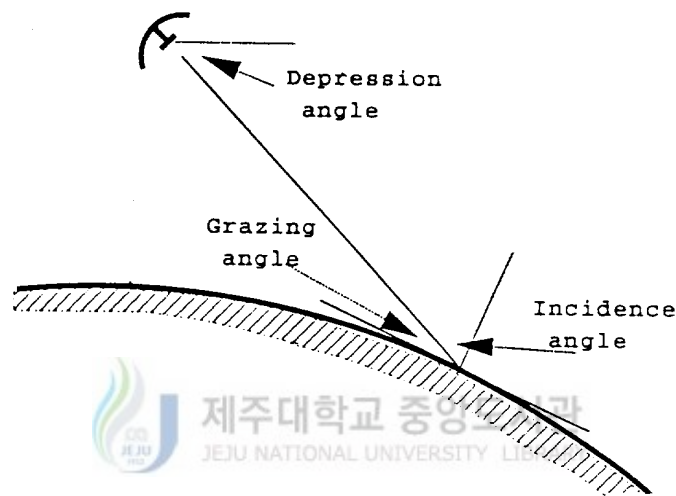


Fig.3 Grazing angle, depression angle

클러터의 특성을 해석하는데 가장 어려운 점은 산란 되어지는 물체에 대한 특성을 적절히 표현할 수 있는 방법이 부족하다는 점이다. 바다의 상태는 일차적으로 바람의 세기와 바람이 불었던 시간과 거리등에 의해 결정된다. 한편, 지면 클러터는 지역의 특성과 상태에 따라 매우 다양하다. 도시지역, 농촌지역, 숲, 산, 열대지역, 한대지역등 지역에 따라 각각 다른 레이다 에코를 발생

시킨다. 더우기 육지에 의한 산란은 비나 눈, 농작물의 종류, 계절, 호수, 인공구조물등 여러가지 요소에 의해 영향을 받는다. 지면 클러터와 해면 클러터 사이에는 많은 변화요소가 있다. 이러한 다양한 변수들을 분석하여 레이다 시스템 설계시 고려하여야 한다.

## 2.4 표면 클러터 대 잡음

### 1) 표면 클러터

지면 및 해면 클러터를 표면 클러터라 하며 Fig.4는 표면 클러터를 계산하기 위해 기하학적으로 나타낸 그림이다. 4/3 등가지구반경이 사용 되었고, 평균 클러터 역산란(backscatter)계수  $\sigma^0$ 는 grazing각  $\alpha$ 에 따라 변화 한다고 가정 하였다. 또한 클러터 계수는 확률 방법에서 공간적, 일시적으로 변화하고 클러터의 형태에 따라 좌우된다. (W.A.Skillman, 1987)

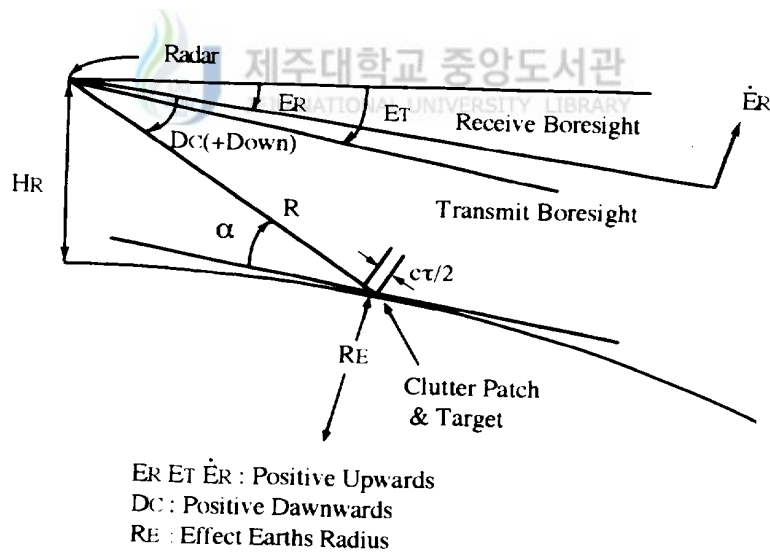


Fig.4 Surface clutter geometry, 4/3rds earth radius model



클러터 패치(patch)로부터 역산란되는 평균 클러터대 잡음비는 range gate R 과 수평 빔폭(azimuth beamwidth)의 지구 표면을 교차 시킴으로써 정의된다.

$$C/N(R) = \frac{P_T P_C \lambda^2 G_T G_P \theta_{AZ} (c \tau / 2) \sigma^\circ K_{bo}}{(4\pi)^3 L_c k T_s B_R R^3 \cos \alpha} \quad (14)$$

여기서  $P_T$ 는 송신 전력(W),  $P_C$ 는 펄스 압축율,  $\lambda$ 는 파장,  $G_T$ 는 송신 안테나 이득,  $G_R$ 는 수신 안테나 이득,  $G_P$ 는 Doppler 또는 MTI processing gain,  $\theta_{AZ}$ 는 수평 반전력 빔폭,  $c$ 는 광속도,  $\tau$ 는 압축된 펄스폭,  $\sigma^\circ$ 는 평균 클러터 반사계수,  $T_s$ 는 시스템 잡음온도(°K),  $L_c$ 는 클러터 손실( $\geq 1$ ),  $B_R$ 는 수신기 대역폭(Hz),  $k$ 는 Boltzmann 상수( $1.38054 \times 10^{-23}$  W/Hz/K),  $\alpha$ 는 grazing angle,  $K_{bo}$ 는 송수신 빔 overlap factor를 나타낸다. 식(14)를 간략히 하기 위해 공통인수를 상수  $K_1$ 으로 모으면 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{P_T P_C \hat{G}_T \hat{G}_R \lambda^2}{T_s L_c B_R} \quad (15)$$

여기서  $\hat{\phantom{x}}$ 는  $G_T, G_R$ 에 대한 최대이득을 나타낸다.

대부분의 레이더는 monostatic radar로 하나의 안테나를 송수신 공용으로 사용한다. 그러나 bistatic 레이더는 CW 레이더로 송수신 안테나가 분리된 형태이다. 안테나가 수평 분리된 경우의 빔 crossover range  $R_c$ 는  $\theta_{AZ}$ 와 안테나 중심 사이의 거리  $\Delta X$ 로부터 계산된다.

$$R_c = \frac{\Delta X}{\theta_{AZ}} \quad (16)$$

클러터 return은  $R_c$ 보다 작은 거리에서 0으로 가정 하였고  $R_c$ 보다 큰 거리에서는 수평에서 fractional beam overlap에 비례한다. overlap factor  $K_{bo}$ 는

$$K_{bo} = 1 - \frac{R_c}{R} \quad (17)$$

이며, 클러터대 잡음비(C/N)를 계산하기 위해 사용된 식은 식(14)에  $K_1$ 을 대입함으로써 구하여 진다.

$$(C/N)_{dB} = 61.77 + (\sigma^\circ)_{dB} + 10 \log_{10} \{K_1 K_{bo} \Delta G_T \Delta G_R \theta_{AZ} \tau / [R^3 \cos(\alpha)]\} \quad (18)$$

(  $\sigma^\circ$  : [m<sup>2</sup>],  $\theta_{AZ}$  : degrees,  $\tau$  :  $\mu s$ , R : nmi )

여기서  $\Delta G_T$ ,  $\Delta G_R$  는 최대이득에 대한 송수신 이득이다.

주빔은 Gaussian beam 모양으로 근사화 되었으며 ( $\Delta G$ )<sub>dB</sub>는 다음과 같다.

$$(\Delta G)_{dB} = -12(\Delta \theta / \theta_{EL})^2 \quad (19)$$

여기서  $\Delta \theta$ 는 빔의 최대로부터 클러터까지의 가시거리의 수직분리이고,  $\theta_{EL}$ 은 반전력 수직 빔폭이다. 주 빔 외부의 빔 모양은 첨두이득에 대하여 일정한 sidelobe level  $G_{SL}$ 을 갖으며 송수신 빔은 수직으로 무관하게 위치시킬수 있다. 송신 빔은 수직각  $E_T$ 에서 고정된 반면 수신 빔은 송신되는 동안 수직각  $E_{R0}$ 에 위치해 있다. 클러터가 정확한 거리상에 있다면, 수신 빔은 수신시간동안  $\dot{E}_R$ 율로 수직으로 스캔된다. 수신 빔 elevation  $E_R$ 은 거리 R의 함수로서 scanning하는 경우에  $E_R$ 은 다음과 같다.

$$E_R = E_{R0} + 2R \dot{E}_R / c \quad (20)$$

펄스 반복 주파수(PRF)가 충분히 높다면 하나의 수신 range gate에 들어가는 클러터는 모든 클러터 패치로부터 range gate 거리까지의 클러터의 합이 된다. 이러한 조건은 레이더 수평거리  $R_{HOR}$ 을 사용하여 시험되었고 4/3 지구등가 반경  $R_E$ (4588 nmi), 레이더 고도  $H_R$ 을 사용하여 계산된다.

$$R_{HOR} = \sqrt{H_R(2R_E + H_R)} \quad (21)$$

수평의 depression angle(positive down)  $D_{HOR}$ 은

$$D_{HOR} = \cos^{-1} \left[ \frac{R_E}{R_E + H_R} \right] \quad (22)$$

이며, 거리를 펄스 사이의 간격으로 환산하면 다음과 같다.

$$\Delta R = c/(2PRF) \quad (23)$$

여기서  $\Delta R < R_{HOR}$ 이면 지면 클러터는 모호한 영역에 있게 된다. 이 경우에 모호한 영역  $R_{amb}$  ( $< \Delta R$ )의 range gate에 대한 표면 클러터는 모든 모호한 영역 셀(cell)로부터  $R_{amb}$ 까지 수신된 전력의 합이다.

$$C/N_{TOT}(R_{amb}) = \sum C/N(R_{amb} + i \Delta R) \quad (24)$$

여기서 합은  $45^\circ$  보다 작은 depression angle과 지면이 교차하는 첫번째 셀(cell)에서 시작하고  $R_{HOR}$ 보다 작은 거리의 마지막 cell에서 끝난다.

## 2) 클러터에서의 목표물 탐지와 신호대 잡음비

거리  $R$ 에서  $\sigma$ 인 레이다 단면적을 갖는 목표물에 대한 신호대 잡음비는 다음과 같이 구할수 있다.

$$S/N(\sigma, R) = \frac{P_T P_C \lambda^2 G_T G_R G_p \sigma}{(4\pi)^3 L_T k T_S B_R R^4} \quad (25)$$

목표물이 지표면 상에 있다면 안테나 이득은 클러터와 목표물에 대해서 동일하다. 신호대 잡음비를 dB로 표현하면 다음과 같다.

$$(S/N)_{dB} = 24.92 + 10 \log_{10}(K_{IT} \Delta G_T \Delta G_R \sigma / R^4) \quad (26)$$

여기서  $K_{IT}$ 는  $K_1 L_C / L_T$  이다. 따라서 신호대 잡음 클러터비는 다음식으로 구하

여 진다.

$$[S/(N+C)]_{dB} = (S/N)_{dB} - 10 \log_{10}[1+(C/N)] \quad (27)$$

지면 클러터대 잡음비 C/N의 비교적 큰 값은 비동기(noncoherent) 검파의 관심이 되는 표면 목표물의 탐지는 제외한다. 도플러(Doppler) 필터링을 사용하는 동기(coherent) 검파는 고정된 클러터에 대한 처리이득보다 방사형의 이동 목표물에 대한 처리이득을 더 공급함으로써 클러터로부터 목표물을 분리할 수 있도록 한다. 해면 클러터는 일반적으로 지면 클러터보다 낮기 때문에 비동기 검파로 목표물 탐지가 가능하다. 특정한 레이더 성능이 목표물 신호대 잡음비 T/N으로 얻어진다면 이 성능에 대한 최소 목표물 단면적  $\sigma$ 는

$$\sigma_{\min}(R) = T/N \frac{1 + [C/N(R)]}{S/N(1,R)} \quad (28)$$

이 된다.

## 2.5 지면 및 해면 클러터 특성



지상에 설치된 레이더는 언덕, 산등과 같은 지형으로 부터 강한 에코신호를 수신한다. 지표면의 반사는 보통 항공기와 같은 원하는 목표물의 반사보다 크게 나타난다. 그러므로 지면 클러터(ground clutter)는 레이더의 탐지 능력을 떨어뜨리는 원인이 된다.

1967년 W.H.Peak가 제안한 지표면에 대한 클러터 단면적은 수평복각  $\theta$  와 안테나 빔에 의해 포착될 수 있는 단위면적당 레이더 단면적(radar cross section)인  $\sigma^0$  함수로 다음과 같이 표현할수 있다. (Maurice W.Long, 1975)

$$S = \frac{\sigma^0}{\sin\theta} = 4\pi k^4 \sin^3 \theta T_i W \quad (29)$$

여기서  $k$ 는 전파상수,  $T_i$ 는 수직, 수평면파에 대한 표면의 전기적 특성을 나타내는 반사계수,  $W$ 는 표면에 대한 모델함수로서 다음과 같다.

$$T_v = \left| \frac{(\epsilon-1)[\epsilon(1 + \cos^2 \theta) - \cos^2 \theta]}{\left[ \epsilon \sin\theta + \sqrt{(\epsilon - \cos^2 \theta)} \right]^2} \right|^2 \quad (30)$$

$$T_h = \left| \frac{\epsilon-1}{\left[ \sin\theta + \sqrt{(\epsilon - \cos^2 \theta)} \right]^2} \right|^2 \quad (31)$$

$$W = \frac{2 \bar{m}_s}{\pi} \int_0^\infty \rho(r) J_0(2kr \cos \theta) r dr \quad (32)$$

여기서  $\bar{m}_s$ 는 지표면의 굴곡의 높이에 대한 자승 평균이고  $\rho(r)$ 은 표면에 대한 자기상관 함수,  $r$ 은 측정위치까지의 거리,  $J_0(x)$ 는 0차 베셀(Bessel)함수이다. 또한 해면클러터는 파고의 기울기, 수평복각  $\theta$ 에 크게 영향을 받는다. 따라서 해면 클러터에 대한 클러터 단면적은 다음식으로 주어진다. (Merrill I. Skolnik, 1970)

$$\sigma = \mu \cot^2 \delta_0 e^{-\cot^2 \theta / \tan^2 \delta_0} \quad (33)$$

여기서  $\tan \delta_0$ 는 파고의 평균기울기,  $\theta$ 는 안테나 빔 방향과 지면이 만나는 수평복각이고  $\mu$ 는 UHF 대에서 약 0.1값을 갖는 상수이다.

## Ⅲ. 덕트(Duct)의 특성

### 3.1 대류권 전파

일반적으로 대기의 온도는 지상에서 높고 고도가 높아짐에 따라 낮아지나 일정한 높이에 도달하면 온도의 강하가 정지된다. 이러한 면을 대류정(tropopause)이라 하며 지표면에서 대류정까지를 대류권(troposphere)이라 한다. 대류권의 두께는 적도지방에서 16km, 온대지방에서 10~12km, 극지방에서 9km 정도이나 보통 지상 10~15km 상공까지를 대류권의 두께라 한다. 이 대류권내에서는 항상 대류가 일어나고 있어 비, 바람, 눈과 같은 기상 변화를 일으키며 기온, 습도, 기압에 영향을 준다. 이러한 대기요소의 변화는 대기 유전을 변화를 일으키는 원인이 되고 유전율의 변화는 대류권내를 전파하는 전파의 전파상에 영향을 미치게 된다. 실제로는 이러한 대기요소 중에서도 기압은 시간적 변화가 적어 영향을 별로 주지 않으나 기온과 습도는 변화가 크기 때문에 대류권 전파에 커다란 영향을 끼친다. 습도는 보통 상대습도로 나타내며 상대습도 60%의 대기를 표준대기라고 한다. 기온은  $6.5[^\circ\text{C}/\text{km}]$  정도로 낮아지고 있으나 한랭, 온난전선 등이 있을 경우에는 경계면상에서 급격한 온도의 변화가 나타나며 기타 원인에 의해서도 역전층이 생성될 수 있다. 이외의 전파에 영향을 주는 원인으로서 대기의 와류등에 의해 굴절율에 영향을 미쳐 전파 전파에 영향을 주고 있다.

### 3.2 대류권 내에서의 대기의 굴절을

대기에는 많은 양의 수증기가 포함되어 있고 상대습도는 고도에 따라 점점 감소하고 있다. 즉 대기의 유전율은 수증기의 많고 적음에 커다란 영향을 받는다. 비유전율이  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  인 대기층이 연속되어 있을때 굴절을  $n$ 과의 관계는

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (34)$$

와 같은 식으로 표현된다. 여기에서 대기의 굴절율은 유전율에 관계되며, 유전율은 상대습도에 의해 커다란 영향을 받으며 이 습도는 기온에 따라 습도의 많고 적음이 결정되므로 대류권에서 대기의 굴절을 고려할때, 기온과 습도가 고도에 의해서만 변화하고 수평방향으로 변화가 없다고 가정한다면 대기를 서로 다른 유전율을 갖는 무한히 얇은 대기층이 수직방향으로 무한히 겹쳐 쌓인 것으로 생각할 수 있다. 따라서 서로 붙어있는 두개의 대기층에 대해 snell의 굴절법칙을 적용할 수 있다. Fig.5(a)에서 굴절율이  $n_0$ ,  $n_1$ 인 두층이 접해 있을때 snell의 법칙에 의하여 다음과 같다.

$$n_0 \cdot \sin \beta_0 = n_1 \cdot \sin \beta_1 \quad (35)$$

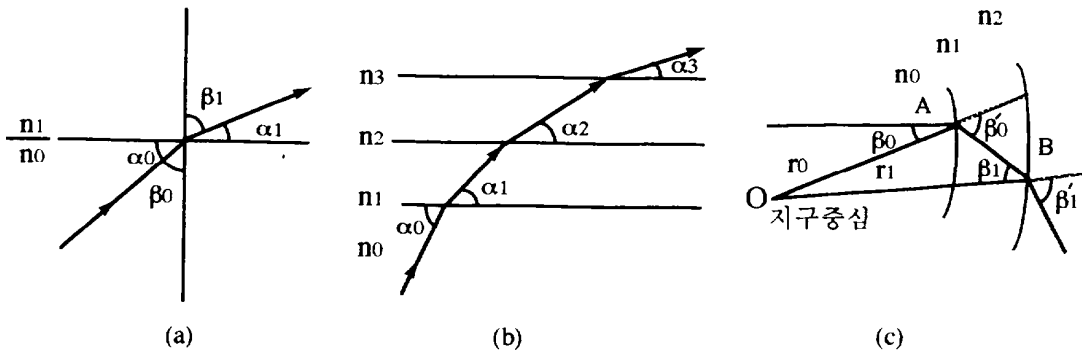


Fig.5 Snell's law

여기서  $\beta_0, \beta_1$ 는 전파의 poynting vector가 법선과 이루는 각이다.  $\beta_0, \beta_1$  대신  $\alpha_0, \alpha_1$ 을 사용하여 snell의 법칙을 표현해 보면

$$n_0 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (36)$$

이 된다. 또한 대기층은 굴절율이 변하는 무한한 층으로 연속되어 있는 것으로 가정하였으므로 snell의 법칙을 일반화하면 식(36)은

$$n_0 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \cos \alpha_1 = n_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (37)$$

가 되며 굴절율이 계속해서 변할때 높이의 함수로 표시된  $n$ 과  $\alpha$ 를 사용하여 표현하면

$$n \cdot \cos \alpha = n_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (38)$$

가 되나 실제로는 지면이 구면이므로 대기층도 구면을 이루고 있어 굴절법칙이 달라지게 된다. Fig. 5(c)에서

$$n_0 \cdot \sin \beta_0 = n_1 \cdot \sin \beta_0', \quad n_1 \cdot \sin \beta_1 = n_2 \cdot \sin \beta_1'$$

가 되며 각 식에  $r_0, r_1$ 을 곱해 주면

$$n_0 r_0 \cdot \sin \beta_0 = n_1 r_0 \cdot \sin \beta_0', \quad n_1 r_1 \cdot \sin \beta_1 = n_2 r_1 \cdot \sin \beta_1'$$

이 된다. Fig. 5(c)에서  $r_1 : r_0 = AB \sin \beta_0' : AB \sin \beta_1$ 가 되므로

$$r_0 = \frac{r_1 \cdot \sin \beta_1}{\sin \beta_0'}$$

로 표현되며  $r_0$  대신 대입하면 위의 식은

$$n_0 r_0 \cdot \sin \beta_0 = n_1 r_1 \cdot \sin \beta_1 = n_2 r_2 \cdot \sin \beta_2 \quad (39)$$

이 된다. 여기서 경계면과의 각을  $\alpha$ 라 하면 연속 변화하는 굴절율에 대해 snell의 법칙은 다음과 같이 일반화 된다.

$$n r \cos \alpha = n_0 r_0 \cos \alpha_0 \quad (40)$$



### 3.3 수정 굴절을

식(38)은  $r = r_0 + h$ 이므로

$$n(1 + h/r_0)\cos\alpha = n_0 \cdot \cos\alpha_0 \quad (41)$$

가 되며 지구반경  $r_0$ 는 송신 안테나의 높이  $h$ 에 비해 매우 크기므로  $h/r_0 \ll 1$ 이 성립되며  $n$ 은  $1 < n < 10,000$ 과 같은 범위내에서 변화하므로  $n(1+h/r_0)$ 는 다음과 같이 근사화된다.

$$n(1 + h/r_0) \approx n + h/r_0 = m \quad (42)$$

여기서  $m$ 을 수정굴절율이라 하며 식(42)를 사용하면 식(41)은

$$(n + h/r_0)\cos\alpha \approx n_0 \cdot \cos\alpha_0 \quad (43)$$

또는

$$m\cos\alpha \approx n_0 \cdot \cos\alpha_0$$

이 된다. 대기의 실제 굴절을 수정한 수정굴절을 사용하게 되면 구면 대기층에 대한 snell의 법칙은 평면 대기층에 대한 식과 같이 간단하게 표현된다. 식(42)는 실용상의 단위  $10^{-6}$ 을 취해 표현하면

$$M \equiv (n + h/r_0 - 1) \times 10^{-6} \quad (44)$$

가 되며 이러한 수정굴절을  $M$ 단위 (MU, M unit) 수정굴절율이라 하며 보통 이를 사용하여 대기의 굴절을 나타내고 있다. 실제의  $M$ 값의 변화는 200~500사이이며 지표면에서  $M_0 = (n_0 - 1) \times 10^6$ 이 된다. 식(44)를 보면  $M$ 은  $h$ 의 함수라는 것을 알 수 있으며 높이 1[m]당 0.157 MU의 비율로 커진다. 온대지방에서 표준대기에 대한 굴절율의 높이에 대한 감소율은 실험결과 평균적으로 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{dN}{dh} = \frac{dn}{dh} \times 10^6 = -0.039 = -\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{r_o} \times 10^6 \text{ [MU/m]} \quad (45)$$

또한 M의 수직높이에 대한 증가율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dh} &= \left[ \frac{dn}{dh} + \frac{1}{r_o} \right] \times 10^6 = (-0.039 + 0.157) \\ &= \left[ -\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{r_o} + \frac{1}{r_o} \right] \times 10^6 \\ &= \frac{1}{\frac{4}{3} r_o} \times 10^6 \approx 0.118 \text{ [MU/m]} \end{aligned} \quad (46)$$

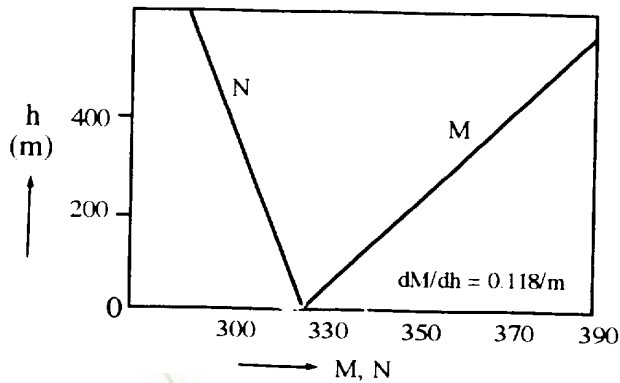


Fig. 6 Variation of N, M

따라서 표준대기에서 임의의 높이에 있어 M값은 지표면의 값  $M_0$ 에 대해

$$M - M_0 = 0.118h, \quad M = M_0 + 0.118h \quad (47)$$

가 된다. Fig. 6은 높이에 따른 굴절율의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 대기의 굴절율  $n$ 은 대기의 습도, 압력, 수증기 압력의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$(n - 1) \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \left[ P + \frac{4810e}{T} \right] \quad (48)$$

T : 절대온도[° K] P : 대기압[mb] e : 수증기압[mb]

이 식에서 보통의 대기상태에서는 (n-1)값은  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  정도의 값이며 이 미소한 변화가 대류권 전파의 모든 현상을 발생시킨다. 또한 M의 실험식은 아래와 같다.

$$M \equiv (n + h/r_0 - 1) \times 10^6 = \frac{77.6P}{T} + \frac{4810e}{T^2} + 0.157h \quad (49)$$

### 3.4 라디오 덕트(Radio Duct)와 초굴절(Super-refraction)

수정굴절을 M값의 변화를 높이에 대해 그린 M곡선에 의해 초단파 통로의 굴절상태를 알 수 있다. 실제의 M곡선은 Fig.7의 5가지 중에서 어느 한 형태를 가지고 있다. 이들중에서 주목할 만한 것은 고도가 높아질수록 수정굴절을 M이 감소하는 ④, ⑤곡선이다. M이 감소하는 이유는 어떠한 높이에서 상공으로 올라감에 따라 굴절을 n이 급하게 감소하기 때문이다. 이런때에는 굴절율의 역전층이 생긴다. 이러한 역전층에서는 전파통로의 곡률이 지표면의 곡률보다 크므로 이러한 층내로 들어온 전파는 십사리 층 외부로 빠져 나가지 못하고 이러한 층이 널리 퍼져 있으면 가시거리보다 먼거리까지 전파된다. 이러한 현상을 전파의 트래핑(trapping)이라 하며 실제로 전파가 포획된 층의 두께는 역전층의 두께보다 크며 포획된 전파는 도파관내를 전파하는 전파와 마찬가지로 이층에서 이탈하기가 매우 어렵다. 즉, 이러한 층은 도파관과 같은 역할을 한다고 할 수 있으며 이러한 대기층을 라디오 덕트 (radio duct)라고 하며 Fig.7의 ④, ⑤에 나타내었다.

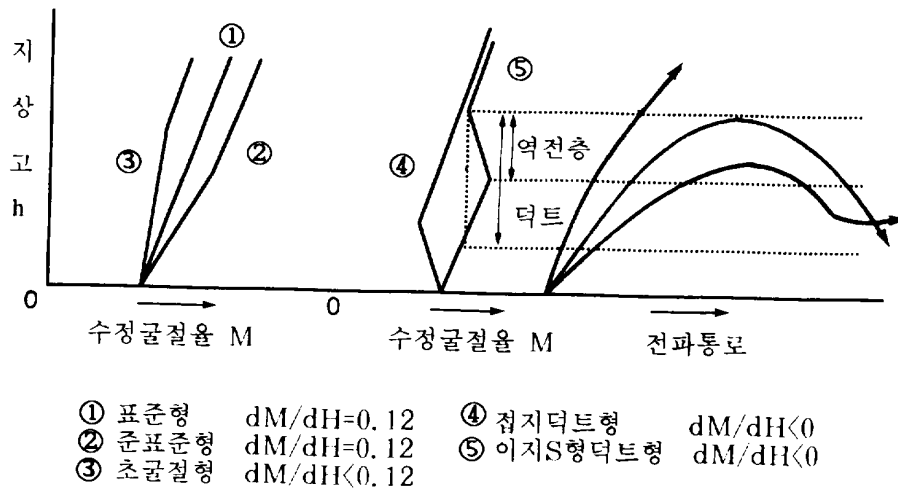


Fig. 7 M curves

이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 radio duct는 M곡선의 위쪽에 있는 최소 점으로부터 내린 수직선과 하부의 곡선이 만나는 점 사이의 공간을 말하는데 duct에는 2가지 종류가 있다. Fig.7의 ④와 같은 접지성 덕트 (ground based duct, surface duct)와 ⑤와 같은 이지성 덕트 (공중성 덕트, elevated duct)가 있다. 덕트가 생성되는 높이는 추울때는 수[m]의 낮은 높이에서 생기고 더 올때는 수 100m~수 1000m의 높은 곳에 생긴다. Fig.7의 ②는 준표준상태 (substandard type)인데 여기에서 M곡선의 낮은쪽의 기울기가 표준형보다 작으므로 이 대기층으로 들어간 전파는 표준대기때 보다 아래쪽으로 작게 굽어지며 심할때는 위로 굽어진다. 이 때문에 송신 안테나의 높이를 높게 해주면 낮은 대기층의 준표준영역의 전계강도를 정상치보다 작게 할 수가 있다. ③은 전이 형으로서 M곡선 하부의 기울기가 정상치보다 큰 경우인데 이런 형은 접지형 덕

트가 발생하는 도중에 나타나는 과도기적 형태인데 온도나 습도의 약간의 변화에 의해서도 ④의 형태로 쉽게 바뀐다. 다음에 전파의 전파상태에 관해 고려하면 표준대기의 M곡선이 Fig. 8(a)이다.

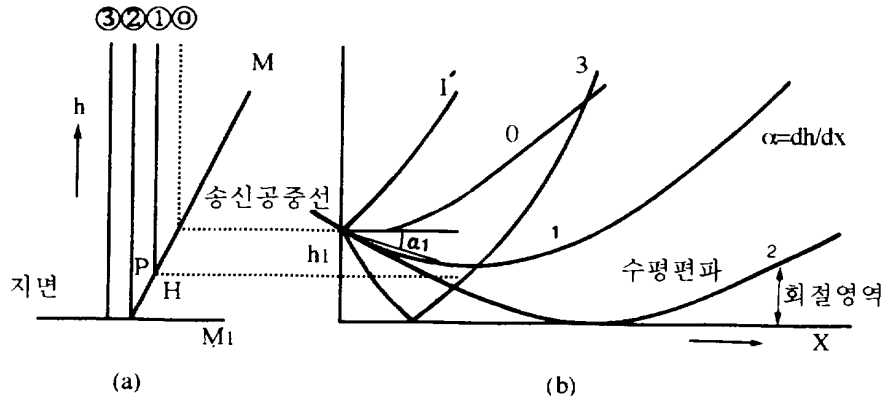


Fig. 8 Propagation path of standard atmosphere

안테나와 수평으로 각도  $\alpha$ 로 들어온 전파의 통로는 1과 같은데 높이  $h$ 의 감소에 따라 점차 구부러지며 진행하다가 p점에서 수평으로 그후는 위쪽으로 진행하며 기울기는 높게 올라 갈수록 커지고 있다. 이보다 작은 입사각을 갖는 경우의 전파통로는 0, 1' 과 같으며 더 큰 입사각을 갖는 경우는 2, 3과 같은 전파통로를 가진다. 다음에 덕트내에서의 전파통로를 고려하면 Fig. 9(a)와 같은 접지성 덕트내의 전파통로는 Fig. 9(b)와 같이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 M곡선이 부의 기울기를 가지면 전파의 통로는 수평방향에 대해 위로 볼록한 곡선으로 된다. 이때 덕트의 곡률은 지표면의 곡률보다 크므로 수평방향에 대

해 아주 작은 각으로 입사한 전파는 수평방향이 될때까지 차츰 전파통로가 굽어지며 이후는 차차 아래쪽으로 구부러진다. 이러한 전파상태를 초굴절(super refraction)이라고 한다. 이러한 초굴절을 하는 전파는 이미 덕트내에 빠져 들어간 것이며 덕트의 상하면 사이에서 진동하며 전파된다. Fig.10과 같은 이지성 덕트에서는 덕트의 상하층에서 초굴절이 일어나며 전파의 전파통로는 Fig.10(b)와 같이 된다.

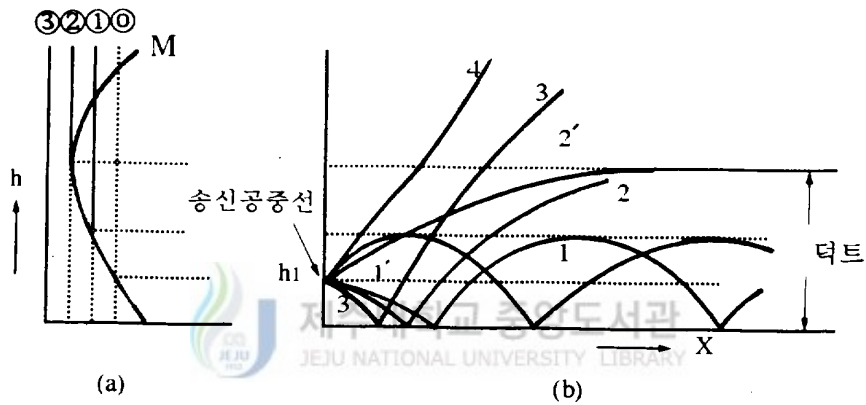


Fig. 9 Propagation path of ground based duct

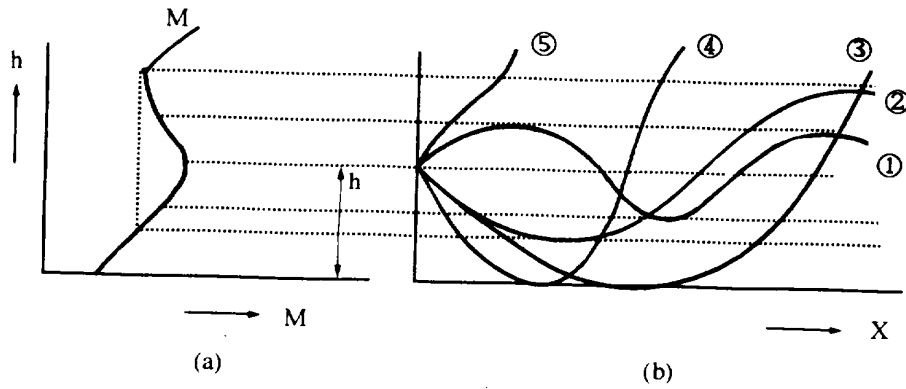


Fig.10 Propagation path of elevated duct

### 3.5 라디오 덕트 발생 확률

라디오 덕트 발생조건은 대기의 상층부가 하층부보다 고온 저습 할때 나타난다. Fig.11은 기온 역전 현상으로 나타나는 S형 덕트를 나타낸 그림이다. 덕트의 형태는 덕트의 세기  $\Delta M$ , 역전층의 굴절율  $\alpha_d$ , 역전층의 두께  $\Delta H$  그리고 덕트의 높이  $H$ 로 표현한다.

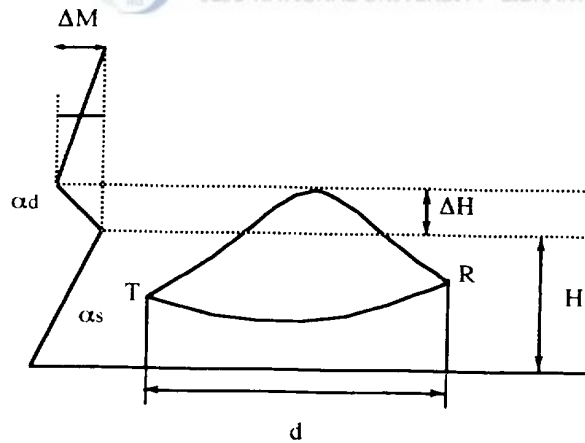


Fig.11 Explanation of radio duct

여기서 T는 송신기 R은 수신기의 위치,  $\alpha_s$ 는 대기 표면층의 굴절을 그리고 d는 송수신기간의 거리이다. 덕트의 세기  $\Delta M$ 과 역전층의 굴절을  $\alpha_d$ 는 서로 밀접한 상관관계를 갖고 있으며 라디오 덕트가 발생할 확률에 커다란 영향을 미친다. 따라서 라디오 덕트의 발생확률 누적분포함수는 굴절을 구배의 정규 지수분포함수로 다음과 같이 된다 (O.Sasaki and T.Akiyama, 1982)

$$F(\beta) = \frac{1}{2} \exp [4(\beta - \beta_m)/3\sigma] , \quad -\infty < \beta \leq \beta_p$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} [-(\beta - \beta_m)/\sqrt{2} \sigma] , \quad \beta_p < \beta < +\infty \quad (50)$$

여기서  $\beta_m = \Delta N$ ,  $\beta_p = \beta_m - 1.48\sigma$ ,  $\sigma = \sigma_N/\sqrt{\Delta H}$ ,  $\Delta N$ 는 지표로부터 1Km 내의 굴절을 구배  $\Delta N$ 의 월평균 기대값,  $\sigma_N$ 은  $\Delta N$ 에 대한 표준편차 그리고  $\Delta H$ 는 역전층의 두께이다.

역전층의 굴절을  $\alpha_d$ 는 0 MU/Km 보다 적고 굴절을 구배  $\beta$ 는  $-157\text{NU/Km}$  이므로 식(50)의 누적 분포 확률 함수는 다음과 같은 지수함수가 된다.

$$P_{\alpha_d} = \frac{1}{2} \exp \left[ -\frac{4 \bar{\alpha} \sqrt{\Delta H}}{3 \sigma_N} \right] \quad (51)$$

여기서  $\bar{\alpha} = \Delta N + 157 \text{ MU/Km}$  이고  $\Delta N$  과  $\sigma_N$  값은 라디오존데 데이터와 고층 기상 관측소의 데이터를 이용하여 계산한다. 따라서 역전층의 두께를 알고 있으면 덕트의 발생확률은  $\Delta N$  통계로부터 간단히 예측할 수 있다. 또한 여름철인 7~9월 사이에는 낮은 대기층인 표면층에서 덕트가 많이 발생되어 항공 레이다에 지장을 초래할 수 있다. 표면층에서의 덕트발생확률은 표면층과 낮은 대기의 굴절을 구배의  $\alpha_s$  통계자료로부터 다음과 같이 정의된다.



$$P_{a_s} = \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{(\bar{a}_s - 28) \sqrt{H}}{0.566 \sigma_N + 2.67} \right] \quad (52)$$

$$\text{여기서 } \bar{a}_s = \bar{a} - 28, \quad \sigma_s = \frac{1}{\sqrt{H}} (0.755 \sigma_N + 3.56)$$

이고  $a_s$ 는 표면층의 굴절을 구배,  $\bar{a}_s$ 는 표면층 굴절을 구배  $a_s$ 의 기대값,  $\sigma_s$ 는 표면층에서의 굴절을 구배의 표준편차,  $H$ 는 표면층의 두께이다.

### 3.6 덕트 현상에 의한 레이다 수신 전력

레이다에서 송출된 전자파는 자유공간에서는 직진하지만 대기층을 전파하는 전파는 굴절, 반사 및 산란되어 레이다의 탐지거리를 증감시키거나 목표물 탐지를 불가능하게 만든다. 이러한 현상중의 하나가 덕트에 의한 전자파 이상 현상으로서 덕트층으로 입사된 파는 전파의 경로를 달리하여 덕트층 내의 도파로를 따라 전파되기 때문에 물체를 추적하는 레이다에 있어서도 커다란 문제점으로 대두된다.

덕트층은 대기층의 기온과 습도, 대기압 및 증기압이 변화됨에 따라 나타나는 기온 역전층으로서 고도별로 대기의 굴절을 분포를 갖게 되고 덕트층에서도 굴절을 분포가 크게 달라져 전파의 굴절로 인한 탐지거리가 증가되게 된다. 대기의 습도, 압력, 증기압으로 표시된 식(48)과 지구반경  $r_0$ 를 고려한 수정 굴절을 식(49)를 이용하여 고도별로 달라지는 굴절율과 수정 굴절율을 계산한다.

각기 다른 굴절을 값을 갖는 층으로 전파가 임의의 각으로 입사될 때 각 층의 입사각은 snell의 법칙을 사용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\left( n_i + \frac{h_i}{r_o} \right) \cos \alpha_i = n_o \cos \alpha_o \quad (53)$$

식(53)으로부터 각 층의 전파 입사각  $\alpha_i$ 는

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left[ n_o \cos \alpha_o / \left( n_i + \frac{h_i}{r_o} \right) \right] \quad (54)$$

이다. 여기서  $\alpha_o$ 는 최저 고도에 놓인 레이다 안테나에서 목표물을 향하여 송출되는 전자파의 주빔 각도이다. 또한 굴절율이 다른 층을 따라 목표물까지 전파되는 도달 거리는 다음과 같다.

$$r_i = \frac{h_i}{\sin \alpha_i} \quad (55)$$

$$R = \sum_{i=0}^N r_i \quad (56)$$

여기서  $r_i$ 는 각 층의 전파 거리이고  $R$ 는 목표물까지 총 거리이다.



#### 1) 덕트층이 접지형 덕트일 경우

Fig. 9에서 송신 공중선 위치에 목표물이 놓여 있을때 목표물에 입사된 파는 물체가 도체일 경우 전반사 된다.  $\alpha$ 의 각으로 입사된 파는 동일 각으로 반사되어 덕트층을 따라 전파하게 되므로 주빔 방향의 에너지는 레이다 수신기로 되돌아오지 않는다. 그러나 덕트층을 따라 전파되는 도중에 물체가 있을 경우에는 반사된 수신 전력은 레이다에 포착되지만 전파경로가 길어지기 때문에 덕트가 없을 때보다 감소하게 된다. 이때 수신된 에너지는 레이다 방정식에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (57)$$

여기서  $P_t$ 는 송신전력,  $P_r$ 은 수신전력,  $G_t$ 는 송신안테나 이득,  $G_r$ 은 수신안테나 이득,  $\lambda$ 는 레이다 주파수에 의한 파장,  $\sigma$ 는 레이다 단면적 및  $R$ 은 목표물까지의 거리이다.

## 2) 덕트층이 이지형 덕트인 경우

Fig.10에서 목표물이 송신 공중선 위치에 있을 경우 목표물을 향하여 입사된 파는 전반사 되어  $\alpha$ 의 각으로 이지형 덕트층 내로 입사한다. 덕트층으로 입사된 파는  $\alpha$ 각으로 재반사 되어 덕트층을 따라 재반사 된다. 따라서 목표물이 덕트층 내에 있을 때 전파의 도달 거리는 증가하게 되고 수신 에너지는 감소하여 목표물 탐지가 어려워진다. 또한 목표물이 덕트층 밖에 놓인 경우 입사의 각도  $\alpha$ 로 덕트층으로 들어간 전파로  $\alpha$ 가 임계각 보다 작다면 덕트층을 따라 전파되기 때문에 목표물에 도달하지 못한다. 그러나 임계각 보다 크다면 덕트층을 뚫고 목표물로 전파되지만 목표물에 재반사된 파로 다시 덕트층으로 되돌아오기 때문에 극히 일부분만이 수신기에 도달되므로 수신전력이 미약하여 목표물을 탐지하기가 어렵다. 따라서 각 층에서 나타나는 임계각 (Brewster Angle)은 다음과 같다.

$$\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{n_{i+1}}{n_i}\right) \quad (58)$$

### 3.7 덕트의 발생 원인

덕트의 발생원인은 기온 역전현상이고 대기의 굴절율은 온도와 수증기압의 영향을 크게 받는다. 그러므로 대기 상층부가 하층부보다 고온 또는 낮은 습도임이 필요조건이다. 이와 같은 기온 역전을 일으키는 기상상태에 따라 덕트를 분류해보면 다음과 같다.

#### 1) 대양성 덕트

무역풍이 일어나는 대양상에 발생하는 것으로서 습도는 별로 높지 않고 (60~80%) 기온의 역전층은 없으며 온도도 유수온도와 별로 차이가 없다. 이것은 접지성 덕트로서 주간에 발생하며 해안부근에 발생되기 때문에 선박용 레이다의 이상전파의 원인으로 되는 일이 많으며 이러한 덕트는 건조 덕트라고도 한다.

#### 2) 이류성 덕트

해안지대에 발생하는 것으로서 육지와 해상의 기온차에 의한 육풍, 해풍에 의하여 일어난다. 육상의 건조한 대기는 고온 저습하며 이것이 해상으로 흘러 들어가면 저온 고습의 해면상의 대기와 겹쳐져 기온역전과 습도의 불연속성을 발생시켜 덕트를 형성하게 된다. 이 덕트는 해안선으로부터 수십 km 이상의 거리에서는 발생되어도 대기의 확산작용에 의하여 감소하며 해안으로부터 육상 수 km, 해상 수십 km의 범위에서 생긴다.



### 3) 전선에 의한 덕트

온화한 기층의 밑에 한랭한 기층이 비스듬히 유입하여 불연속선이 이루어 질 때 이 부근에 발생하는 덕트이며 S형 덕트가 발생한다. 그러나 바람이나 비를 동반하는 경우에는 대류의 난류때문에 경계면이 선명하지 못하고 전파전파에 미치는 영향은 없다. 또한 강수의 경우 전파전파는 빗방울에 의한 감쇄를 받게 된다.

### 4) 야간 냉각에 의한 덕트

육상에서 덕트 발생에 큰 영향을 미치며 평면지대에서 볼 수 있다. 하늘이 맑을때 하층대기의 상태는 날씨변화에 큰 영향을 끼친다. 시면이 따스해지는 낮에는 단일 평형 상태에 가깝고 M곡선은 표준대기의 M곡선에 가깝다. 그러나 야간에 하늘이 맑고 바람이 별로 없을 때는 지면의 온도변화가 내려가면 온도 저하와 함께 생기는 이슬때문에 수증기 압력도 커지는 영향을 나타내며 M의 값은 하층부분이 커지므로 덕트를 발생시키게 된다. 이러한 덕트의 상태는 안정한 상태이다. 안정한 기층 여부를 나타내는 기준으로서 Richardson number  $R_i$  가 다음과 같이 정의 된다.

$$R_i = \frac{g/T (\partial T/\partial Z + \Gamma)}{(\partial \bar{U}/\partial Z)^2} \quad (59)$$

$\bar{U}$  : 높이 Z에서의 평균 풍속, T : 절대온도 [ $^{\circ}$  K],  $\Gamma/g/C_p = 0.98^{\circ}\text{C}/100\text{m}$

( g : 980cm/sec<sup>2</sup>, C<sub>p</sub> : 공기의 정압 비열)

$R_i < 1$  이면 난류가 발생하며,  $R_i > 1$  이면 안정하게 된다.

$$\bar{U}/\bar{U}_1 = f(Z/Z_1) \quad (60)$$

의 함수형을 취하여  $\bar{U}/\bar{U}_1 = f(Z/Z_1)^m$ ,  $m \geq 0$ 을 사용할 때가 많다.  $d\bar{U}/dZ$ 는  $\bar{U}_1$ 이 작을수록 작게 된다. 이상에서와 같이 야간 냉각에 의한 덤트 발생 조건은  $R_i > 1$ 인 조건과 일치하고 덤트는 안정하게 이어질 가능성이 커진다.

#### 5) 침강성 덤트

야간 냉각에 의한 덤트의 설명에서 확인한 바와 같이 바람이 적고  $dT/dZ > 0$ ,  $de/dZ < 0$ 인 기상현상은 덤트를 발생시키며 이의 한 예가 침강성 덤트이다. 침강 현상은 높은 곳에서 낮은 곳으로 대량의 공기가 침강하는 현상이다. 고기압의 성질로서 내려가는 공기는 건조한 것이 많고 이 때문에  $de/dZ < 0$ 가 되어 덤트가 발생한다.

### 3.8 대기상태가 레이더 전파전파에 미치는 영향

#### 1) 표준대기



대기의 기압, 온도, 습도가 균일하게 변동하여 빔의 복사가 정상 복사 형태를 이룬 상태를 말한다.

#### 2) 트래핑(trapping)

대기의 기압, 온도, 습도가 불규칙하게 변동하여 회절도가 급강하 함으로써 역전층이 덤트를 형성하여 레이더 빔이 덤트를 따라 멀리 전파되므로 덤트내의 항적 포착은 용이하나 원거리의 미포착 클러터가 과다하게 나타난다. 그리고 Beam hole 을 형성하여 항적 미포착 원인이 된다.

### 3) 초굴절

대기의 불균형으로 인하여 역전층이 대기의 상부에 발생함으로써 레이다 빔이 마치 거울에 반사하는 것과 같이 지표면으로 복사되므로 근거리내의 클러터 현상이 과다하게 시현된다. 그러나 포착구역안의 저고도 항적의 포착은 표준대기보다 향상되나 빔의 상부에 hole 구역이 형성되어 고고도 항적의 미포착 원인을 초래한다.

### 4) Sub refraction

역전층이 대기의 하부에 발생하여 회절도가 급상승 함으로써 레이다 빔이 상부로 치우치게 되므로 고고도 항적의 포착은 용이하나 저고도 구역내의 항적 포착은 용이치 않게 된다.

## IV. 계산결과

라디오 덕트 발생 조건은 대기의 상층부가 하층부 보다 고온 저습할 때 나타난다. 이 경우에는 수정굴절을 M곡선이 급격하게 감소하여 굴절을 역전층이 만들어지고 이 역전층 내로 들어온 전자파는 덕트층 외부로 쉽사리 빠져 나가 지 못하고 가시 거리보다 먼 거리까지 전파의 트래핑(trapping) 현상이 발생된다. 이러한 층은 슬랩 도파관(Slap waveguide)과 같은 역할을 하게 된다.

Table 1, Table 2는 고산 기상대에서 측정한 기상 조건이고 Fig.12, Fig.13은 식(48)과 식(49)에 기상 조건을 대입하여 계산한 자료이다.

Table 1 Meteorological data(92.6.20)

| 92/06/20 |         |        |               |
|----------|---------|--------|---------------|
| 기압(mbar) | 고 도 (m) | 온 도(℃) | 포화수증기압 (mbar) |
| 1000.0   | 139.0   | 18.5   | 15.8          |
| 850.0    | 1516.0  | 11.2   | 7.6           |
| 700.0    | 3119.0  | 5.9    | 1.5           |
| 500.0    | 5785.0  | -12.3  | 0.3           |
| 400.0    | 7456.0  | -22.7  | 0.1           |
| 300.0    | 9502.0  | -37.0  | 0.1           |
| 250.0    | 10731.0 | -46.0  | 0.1           |
| 200.0    | 12186.0 | -56.9  | 0.1           |
| 150.0    | 14008.0 | -56.6  | 0.1           |
| 100.0    | 16538.0 | -62.2  | 0.1           |
| 70.0     | 18748.0 | -59.6  | 0.1           |
| 50.0     | 20868.0 | -55.7  | 0.1           |
| 30.0     | 24150.0 | -51.0  | 0.1           |
| 20.0     | 26808.0 | -47.4  | 0.1           |
| 10.0     | 31463.0 | -41.3  | 0.1           |



Table 2 Meteorological data(93.1.5)

| 93/01/05 |         |        |               |
|----------|---------|--------|---------------|
| 기압(mbar) | 고 도 (m) | 온 도(℃) | 포화수증기압 (mbar) |
| 1000.0   | 250.0   | 3.0    | 3.7           |
| 850.0    | 1555.0  | 1.0    | 0.9           |
| 700.0    | 3091.0  | -7.3   | 0.5           |
| 500.0    | 5630.0  | -22.1  | 0.2           |
| 400.0    | 7240.0  | -32.3  | 0.1           |
| 300.0    | 9210.0  | -47.3  | 0.1           |
| 250.0    | 10400.0 | -50.3  | 0.1           |
| 200.0    | 11860.0 | -47.9  | 0.1           |
| 150.0    | 13720.0 | -56.5  | 0.1           |
| 100.0    | 16250.0 | -63.9  | 0.1           |
| 70.0     | 18450.0 | -62.1  | 0.1           |
| 50.0     | 20530.0 | -60.3  | 0.1           |
| 30.0     | 23750.0 | -53.1  | 0.1           |
| 20.0     | 26380.0 | -50.9  | 0.1           |
| 10.0     | 30930.0 | -43.7  | 0.1           |

Table 1과 Table 2는 92년 6월과 93년 1월 중에 측정한 데이터로써 덕트층이 없는 일반적인 대기 상태 하에서 측정한 기상 자료이다. 또한 Fig.12는 Table 1의 조건을 식(48)에 대입하여 구한 M곡선으로서 대기권의 고도가 높아짐에 따라 점차 증가하는 표준형 대기층을 이루고 있다.

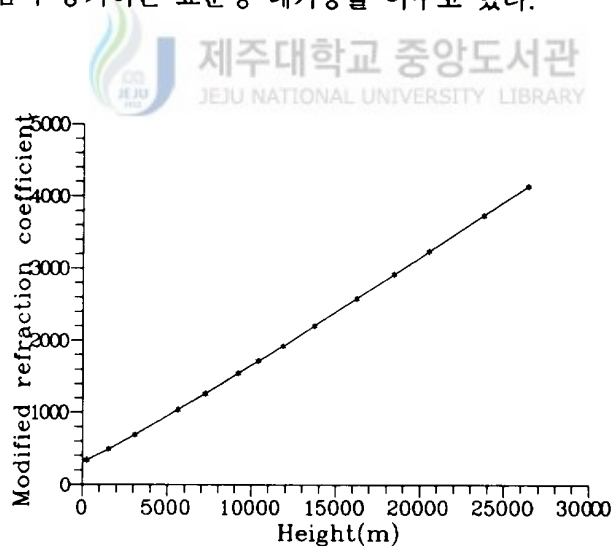


Fig.12 Modified refraction index for standard atmosphere

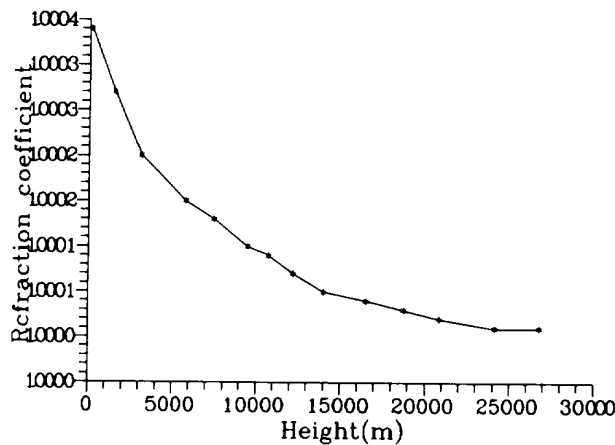


Fig. 13 Refractivity distribution of atmosphere

Fig. 13은 Table 2의 기상자료를 이용하여 고도별로 대기층에 나타나는 굴절율 분포를 그린 그림이다. 고도가 증가함에 따라 기압과 대기의 온도가 감소하고 포화수증기압이 점차 일정하게 변해감으로써 대기의 굴절율은 거의 1인 값에 근접해 간다. Fig. 14는 O. Sasaki가 제안한 덕트의 발생 확률 누적 분포 함수인 식(50)을 이용하여  $\beta$  값에 따른 덕트 발생 누적 분포 함수를 그린 그림이다. 계산에 사용된  $\sigma_N$ 은 고층 기상 관측소의 데이터를 이용하여 계산된 굴절율 분포의 표준 편차 값으로써 약 2.5이고, 덕트층의 높이  $\Delta H$ 는 0.5Km, 대기의 평균굴절율 값은 1.000217이었다. 그림에서  $\beta$ 가  $\beta_P$  보다 작을 경우 덕트가 발생할 누적 분포 함수 값은 5% 미만이다. 이때 대기층에서 S형 덕트가 발생할 확률은 식(52)를 이용하여 19%로 계산 되었고, 표면층 덕트가 발생할 확률은 78%로 나타났다. 이 계산에 사용된 자료는 7월 중의 제주 고산 기상대에서 측정된 기상 자료의 월평균 값을 이용하여 계산한 값이다.

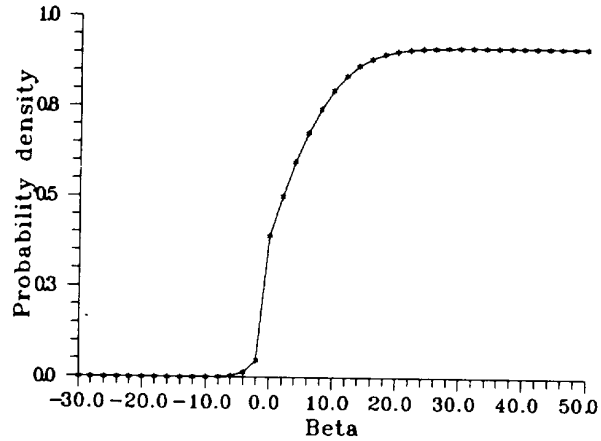


Fig.14 Cumulative probability distribution

Fig.15는 식(8)을 이용하여 계산한 지면 클러터의 특성을 나타낸 것이다. Fig.15(a)는 S-Band 레이다 주파수 2.88GHz에서 지면의 특성이 숲, 그리고 잡초 지역일 때의 레이다 단면적이고, Fig.15(b)는 도심 지역에서의 레이다 단면적이다. grazing각에 따라 나타나는 레이다 단면적은 숲, 잡초 지역 보다 도심 지역에서 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다.

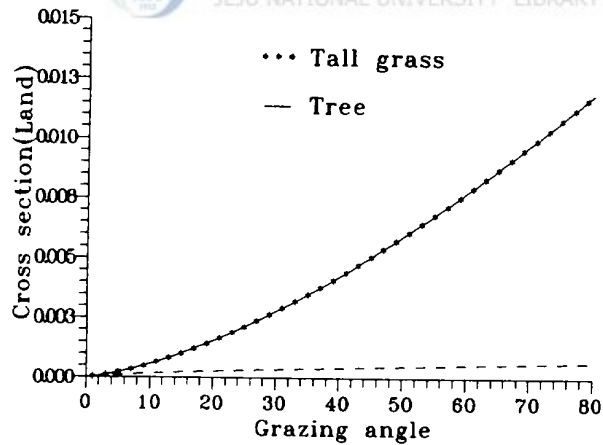


Fig.15(a) Land clutter R.C.S (tall grass, tree)

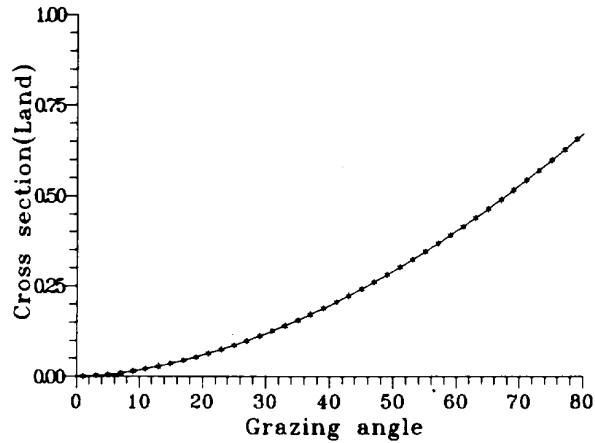


Fig.15(b) Land clutter R.C.S (urban)

Fig.16은 파고의 기울기  $\delta_0$ 를 변화 시켰을 때 식(33)을 이용하여 계산한해면 클러터에 대한 클러터 단면적이다. 특히 grazing각이  $20^\circ \sim 50^\circ$  부근에서 클러터 단면적은 거의 일정한 기울기로 증가하며, 각도가 증가할수록 해면 클러터 특성은 커진다. 또한 파고의 기울기  $\delta_0$ 가 감소함에 따라 해면 클러터 단면적은 증가하게 된다.

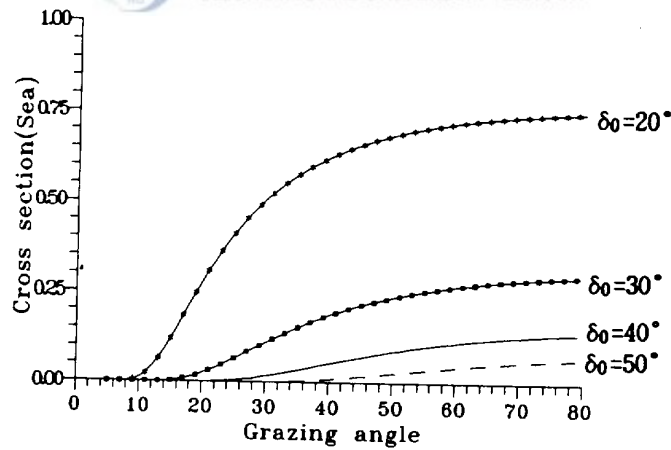


Fig.16 Sea clutter R.C.S

Fig.17에 식(54)와 식(55)를 이용하여 굴절율이 다른 분포를 나타내고 있는 대기층에서 전파를 목표물을 향해 입사 시켰을 때 고도에 따라 달라지고 있는 입사 각도 및 거리를 나타내었다.

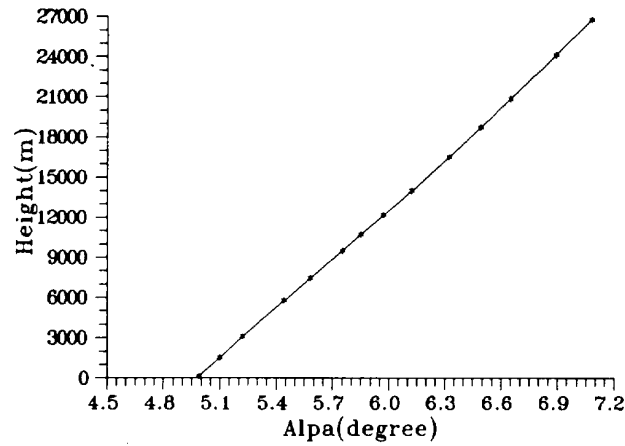


Fig.17(a) Relation between incident angle and height(6.20 data)

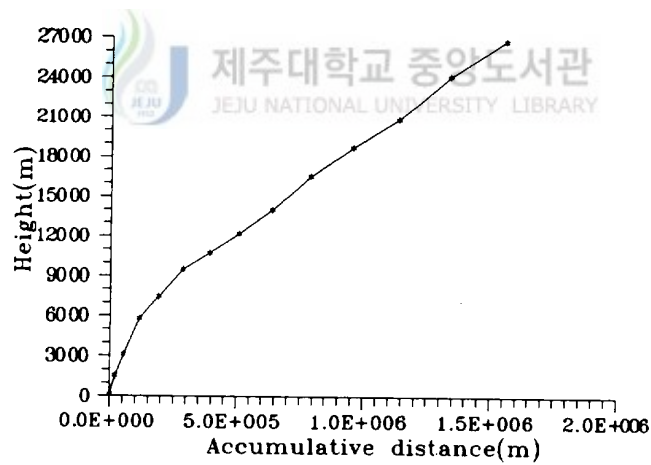


Fig.17(b) Relation between accumulative received distance and height

Fig.17(a)는 고도에 따라 달라지는 대기층의 입사 각도로서 고도가 증가함에 따라 굴절을 분포는 거의 일정하므로 전파 입사각은 일정하게 되고 따라서 목표물까지 전파의 도달거리도 자유공간에서의 전파의 도달거리와 거의 동일해짐을 보여준다. Fig.17(b)에서는 고도에 따라 달라지는 누적거리로서 전파 입사각이 달라지고 전파 도달거리가 길어지면 목표물의 탐지거리가 커지기 때문에 수신 전력이 감소하고 목표물 탐지가 어려워 짐을 알 수 있다.

Table 3은 S-Band 레이더의 퍼라미터에 따른 데이터이고, Fig.18은 서로 다른 굴절을 분포층을 이루고 있는 대기상에 목표물이 있을 때 목표물 단면적이 달라짐에 따라 레이더에 수신되는 수신 전력을 식(57)을 이용하여 계산한 결과이다.

Table 3 S-Band radar parameters and data

| PARAMETER             | DATA                      |
|-----------------------|---------------------------|
| $P_t$ (W)             | 1,200,000                 |
| $P_c$                 | 33.5                      |
| $G_T$ (dB)            | 33.5                      |
| $G_R$ (dB)            | 33.5                      |
| $T_s$ ( $^{\circ}$ K) | 300                       |
| $\lambda$ (cm)        | 10.416                    |
| $L_c$ (dB)            | 0.1                       |
| $B_R$ (Hz)            | 4000000                   |
| $G_p$ (dB)            | 0                         |
| $\theta_{AZ}$ (deg)   | 1.45                      |
| $\sigma^{\circ}$ (dB) | -20                       |
| $H_R$ (ft)            | 142.5                     |
| $\tau$ ( $\mu$ s)     | 1.03                      |
| $k$ (W/Hz/K)          | $1.38054 \times 10^{-23}$ |

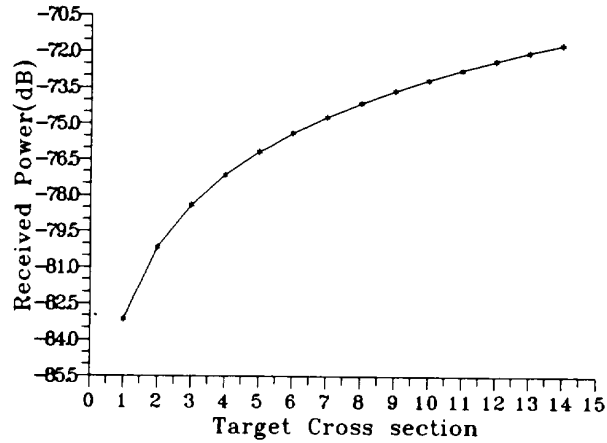


Fig.18 Received power of S-Band radar

목표물 단면이 증가함에 따라 수신 전력은 커진다. 따라서 목표물이 비행물체일 경우 정면보다 측면일 때 수신 전력이 커지고, 측면보다 밀면일 때 더 커진다.

표면 클러터(Surface Clutter)에 대한 클러터 대 잡음비 CNR의 계산은 식 (14)에 의해 계산된 결과로서 Fig.19에 나타내었다. 탐지거리가 증가함에 따라 클러터 대 잡음비가 감소함을 알 수 있다.

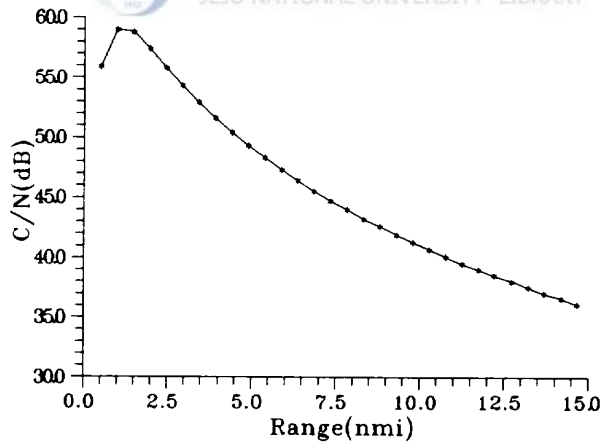


Fig.19 CNR of surface clutter

Fig.20은 레이더 단면적  $\sigma$ 가 66.9, 33.5, 2.2[m<sup>2</sup>]일때의 거리 R에서 목표물에 대한 신호 대 잡음비 SNR의 계산 결과이다. 레이더 단면적  $\sigma$ 가 작아지고 탐지거리가 멀어짐에 따라 SNR은 감소함을 알 수 있다.

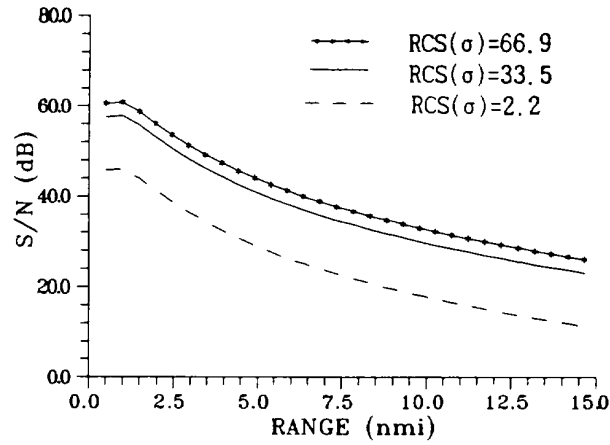


Fig.20 SNR of radar cross section( $\sigma$ )

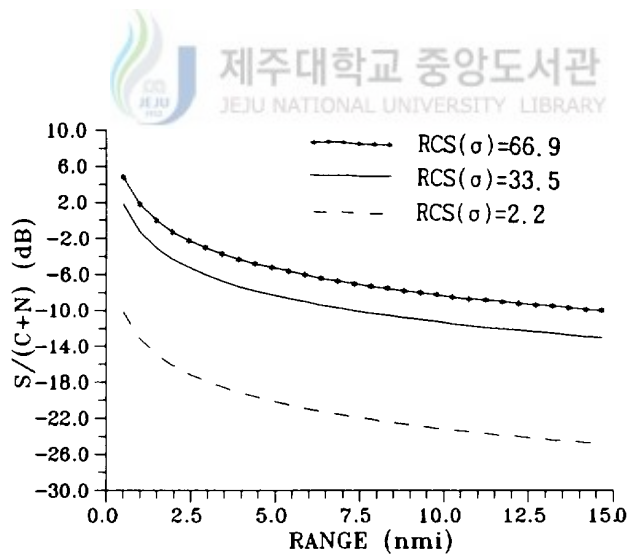


Fig.21 SNCR of radar cross section( $\sigma$ )



Fig. 21은 식(25)에 의해 계산된 결과로서 신호 대 잡음 클러터비 SNCR를 나타낸다. 여기서 계산된 조건은 레이더 단면적  $\sigma$ 가 Fig. 20과 동일한 상태로써 클러터가 더해진 경우이다. Fig. 20과 Fig. 21을 비교하면 클러터 신호가 더해짐으로써 신호 대 잡음비가 감소함을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 O.Sasaki와 Y.Karasawa 및 William A.Skillman의 연구를 토대로 항공 관제 레이다 주파수인 S-band에서 발생하는 덕트 현상과 클러터 현상을 해석하고, 해석된 결과를 이용하여 라디오 덕트 발생 확률을 계산 하였다. 덕트 원인 규명에 사용된 기상자료는 '92.5~'93.1월 까지 제주 고산 기상 레이다에서 측정된 데이터를 이용하였다.

덕트가 발생될때의 기상조건은 대기의 상층부가 하층부보다 고온 저습할때 주로 발생되며, 이때 수정굴절율 M곡선은 급격하게 감소하여 기온 역전층이 형성된다. 이 층내로 들어온 전자파는 슬랩도파관 역할을 하기 때문에 만약 덕트 층 내에 목표물이 놓여있을 경우에는 목표물 탐지거리가 증가하여 수신전력이 상대적으로 감소되므로 목표물 탐지가 어려워진다. 덕트 발생 확률 계산에 사용된 기상자료는 덕트가 주로 발생하는 계절인 6, 7월중에 측정된 자료를 이용하였으며 각 매개변수 값들은 통계치로써 평균값을 이용 하였다. 이때 대기층에서 덕트가 발생할 확률은 이지형 덕트인 경우 19%, 표면층 덕트는 78%로 나타났다. 또한 덕트가 발생하였을 경우 대기중의 굴절율이 많이 달라지기 때문에 각 층에서 전파 입사각이 달라져 전파 도달거리가 길어지고 목표물 탐지거리가 커져 수신전력이 급격히 감소하였다. 따라서 레이다 단면적이 작아지고 탐지거리가 멀어짐에 따라 신호 대 잡음비 SNR은 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또한 신호 대 잡음 클러터 비는 레이다 단면적이 동일한 상태에서 클러터 신호가 더해지기 때문에 SNCR은 감소하였다.

불필요한 에코로 인한 레이더 클러터를 본 논문에서는 지면 및 해면 클러터에 대하여 계산하였다. 특히 지면 특성이 건물로 밀집되어 있는 도시지역에서 지면 클러터 단면적은 크게 나타났다. 해면 클러터 단면적도 전파의 grazing각이 증가할수록 크게 나타났다.

계산된 결과들과 항공 관제 레이더에서 측정된 항공기 탐적자료를 비교해 보면 제주 부근 지역에서는 한라산 및 지면에 대한 클러터 전력이 PPI스코프상에 크게 나타났으나 덕트현상은 거의 발생하지 않았다. 그러나 기온이 주로 교차하는 바다와 육지 부근지역(해남)에서는 이류성 덕트가 많이 발생되어 항공기가 탐지되지 않는 현상이 주로 발생하였다. 이 원인을 규명하기 위하여 해남 기상대의 자료를 요청하였으나 해남기상대의 자료가 고도별로 측정이 이루어지지 않아 현재로서는 바다와 육지 경계지역 부근인 해남지역에서의 덕트현상은 파악할 수 없었다. 이에 따른 기상자료 구축 및 덕트현상 원인규명은 향후 연구과제이다.

본 논문에서는 대기의 굴절을 분포의 형태와 기상자료를 이용하여 덕트현상과 클러터현상을 해석하였고 항공관제 레이더 주파수 대역인 S-band 에서 기상 변화에 따른 전파전파 특성을 연구하였다. 또한 레이더의 클러터 특성, 대기의 덕트현상에 대한 일반적인 사항을 다루었으며, 이 이론을 근거로 측정된 기상자료 및 S-band 항공 관제 레이더 자료를 이용하여 덕트 및 클러터 현상을 규명하였다. 그리고 항공관제 레이더에서 측정된 항공기 항적 자료와 비교하여 목표물 미탐지 원인을 규명할 수 있도록 덕트 발생 현상, 클러터 탐지 성능 예측, 클러터 단면적, 레이더 탐지거리, 레이더 수신전력, 신호 대 잡음비 등을 계산할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

## VI. 참고 문헌

- o A.Farina, 1992, Antenna-Based Signal Processing Technigue for Radar Systems, Artech House Boston London, Chapter 1, Chapter 3, pp.1~12, pp.59~94
- o D.C.Scheleher, 1976, "Radar Detection in Weibull Clutter", IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, Vol.AES-12, No.6
- o D.K.Barton, C.Z.Kook, Paul Hamilton, 1991, Radar Evaluation Hand-book, Artech House, Chapter 3, pp.3-1 ~ 3-19
- o F.E.Nathanson, J.P.Relly, M.N.Cohen, 1991, Radar Design Principles, McGraw Hill, Inc., Chapter 6, pp.216-231
- o F.T.Ulaby, M.Craig Dobson, 1989, Handbook of Radar Statistics for Terrain, Artech House, Chapter 3, pp.35~64
- o G.V.Trunk,1972, "Radar Properties of Non-Rayleigh Sea Clutter", IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, Vol,AES-8, No.2
- o J.L.Eaves, E.K.Reedy, 1987, Principles of Modern Radar, Van Nostrand Reinhold Company Inc, Chaper 3, 11, pp.51~71, pp.343~367
- o J.P.Reilly,1990, "Clutter Rejection Limitations from Ambiguous Range Clutter", IEEE International Radar Conference, PP.195~200
- o 이 상철, 1991, 안테나 및 전자파 전파, 형설출판사, 9장, 10장, pp.143 ~200

- o Merrill I. Skolnik, 1980, Introduction to Radar System, McGraw-Hill, Inc, Chapter 13, PP. 479~497
- o Merrill I. Skolnik, 1970, Radar Handbook, Naval Research Lab., Chapter 26, pp. 9~10
- o Maurice W. Long, 1975, Radar Reflectivity of Land and Sea, Lexington Books, Chapter 13, pp. 79~81
- o Nadave Levanon, 1988, Radar Principles, John Wiley and Sons, Chapter 4, pp. 64~74
- o N. C. Currie, 1989, Radar Reflectivity Measurement : Technique and Applications, Artech House, Chapter 2, pp. 51~83
- o O. Sasaki and T. Akiyama, 1982, "Studies on Radio Duct Occurrence and Properties", IEEE Trans. Antennas Propagations, Vol. AP-30, No. 5
- o P. J. Kahrilas, 1976, Electronic Scanning Radar Systems (ESRS) Design Handbook, Artech House, Chapter 9, pp. 231~239
- o R. N. Lothes, M. B. Szymanski, R. G. Wiley, 1990, Radar Vulnerability to Jamming, Artech House.
- o S. A. Hovanessian, 1984, Radar System Design and Analysis, Artech House, Chapter 7, pp. 173~210
- o Shigrkazu Shibuya, A Basic atlas of Radio-Wave Propagation, John Wiley and Sons, Chapter 0, 1, 2, 5, 1987.
- o W. A. Skillman, SIGCLUT, 1987, Artech House Boston London

- o Y.Karasawa, T.Shiokawa, 1984, "Characteristics of L-Band Multipath Fading duct to Sea Surface Reflection", IEEE Trans. Antenna Propagation, Vol. AP-32, No.6



## 본 논문과 관련된 저자의 발표 논문

### 1. 학술대회 논문집

- 1) 고흥진, 양두영, 장재성, "S-밴드 레이더에서의 이상전파에 관한 연구", 한국통신학회 하계종합발표회 논문집, pp355~358, 1992.
- 2) 고흥진, 강부식, 장재성, "S-밴드 레이더에서의 클러터 해석", 한국통신학회·전자공학회 제주지부 합동 발표 논문집, pp18~21, 8, 1992.



# 感謝의 글

本 論文이 結實을 맺기까지 끊임없는 激勵과 指導를 해주신 指導教授 張宰成 教授님께 깊은 感謝를 드리며 未備한 論文을 指導 審査하여 주시고 여러가지 가르침을 주신 通信工學科 李鎔鶴 教授님, 金興洙 教授님, 文 建 教授님, 林載允 教授님께 깊은 感謝를 드립니다. 또한 論文이 完成 되기까지 많은 도움을 주신 梁斗榮 教授님, 廉鎭植 教授님, 李相白 教授님께도 感謝를 드립니다.

배움의 길로 한걸음 더 나아갈 수 있도록 配慮해 주신 韓國空港公園 陸完植 理事長님, 徐京柱 支社長님, 尹成鎭 通信 電子部長님, 金鎭國 部長님, 金聖烈 部長님, 朴東圭 課長님, 朴永鎭 課長님, 李珍翼 課長님, 金義燮 課長님께 感謝드립니다. 그리고, 論文이 完成 될 수 있도록 航空機 探知資料 作成에 積極 協助해 주신 濟州支社 電子課 職員여러분과 또한 氣象資料에 도움을 주신 濟州 高層 레이더 氣象隊 隊長님과 職員 여러분에게 感謝를 드립니다.

그리고 論文이 完成되기까지 原稿 整理를 해준 起台와 마이크로파 研究室 後輩 富植, 青旻에게 고마운 마음을 傳합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 精誠으로 보살피고 念慮해 주신 父母님과 兄弟 그리고 어려운 與件속에서도 挫折하지 않도록 忍耐와 사랑으로 激勵를 해준 사랑하는 아내와 함께 이 論文이 完成된 기쁨을 나누고 싶습니다.