

碩士學位論文

氣象레이더에서의 異狀에코와
클러터現狀에 關한 研究



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

通信工學 專攻

許澤山

2003

碩士學位論文

氣象레이더에서의 異狀에코와
클러터現狀에 關한 研究

指導教授 金 興 洙



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

許 澤 山

2003

氣象레이더에서의 異狀에코와
클러터現狀에 關한 研究

指導教授 金 興 洙

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2003年 6 月 日



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 通信工學 專攻

許 澤 山

許澤山の 工學碩士學位 論文을 認准함

2003年 6 月 日

委員長 李 鎔 鶴 印

委 員 康 鎭 植 印

委 員 金 興 洙 印

목 차

Abstract	1
I. 서론	3
II. 이상에코의 특성	5
1. 레이더방정식	5
2. 레이더최대탐지거리	6
3. 대류권 전파	7
4. 대류권 내에서의 대기의 굴절률	8
5. 수정굴절률	11
6. 라디오덕트의 발생 및 종류	14
7. 기상조건에 따른 덕트 종류	16
1) 대양성 덕트	16
2) 이류성 덕트	16
3) 전선에 의한 덕트	17
4) 야간냉각에 의한 덕트	17
5) 침강성 덕트	17
8. 과대굴절	17
III. 클러터의 특성	19
1. 표면 클러터	19
2. 해상 클러터	22

IV. 기상자료분석	24
1. 기상분석	25
2. 대기상태분석	27
1) 맑은 날 이상에코현상이 없는 경우	27
2) 맑은 날 하층에 의한 이상에코현상이 있는 경우	29
3) 맑은 날 상층에 의한 이상에코현상이 있는 경우	36
3. 해상 클러스터분석	43
1) 풍향에 따른 클러스터특성	44
2) 풍속에 따른 클러스터특성	45
V. 결론	47
참고문헌	49



A Study on Abnormal Echoes and Clutters in a Meteorological Radar

Taik-San Heo

Department of Electrical and Electronic Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by Professor Heung-Soo Kim

Abstract

In a meteorological radar, unwanted radar echoes, such as abnormal echoes caused by anomalous propagation or clutters, make difficult the detection of wanted targets. The aim of this paper is to find the weather conditions which make the abnormal propagation of a radar beam and to classify the sea clutter as the velocity and the direction of the wind. In order to analyze the weather conditions which cause superrefraction or ducting, meteorological data of the west sea and the south sea of Korea are classified which are observed during three years from 2000. Atmospheric indexes of refraction with increasing altitude are calculated and the rate of variation of temperature and humidity at the altitude where the index is very low are observed. Unwanted radar echoes caused by superrefraction or ducting are found from comparing the radar images with the satellite images and the necessary and sufficient condition of causing the unwanted radar echoes is proposed. It is found that unwanted radar echoes by anomalous propagation are showed up only when the

atmospheric indexes of refraction at a altitude is less than $-150/\text{km}$ and the reverse layer of temperature appears with a sudden drop of humidity at the altitude. The echo from the surface of sea and sea clutter is dependent upon the height of wave, the speed of wind, and the direction of the waves relative to that of the radar beam. The radar images are observed with the condition of wind of that day. It is certified that the feature and the size of a sea clutter varied with the condition of the wind.



I. 서론

기상레이더는 비, 눈, 구름의 이동상황 그리고 돌풍이나 태풍의 진로 등 기상 정보를 정확하게 관측하고 예보하기 위해 사용되고 있다. 그러나 일반적으로 탐색 레이더인 경우에는 비, 눈 등을 클러터라고 부르고 있으나, 기상레이더에서는 오히려 지면이나 항공기 등의 표적을 클러터라고 부르는 서로 상반된 운용 개념을 가지고 있다. 따라서 이와 같이 강수현상 등을 관측하는 목적에 사용되는 레이더를 일반적으로 기상레이더라고 부르며, 이외에도 우량만을 측정하는 우량 측정 레이더, 번개 구름을 탐지하는 번개 탐지 레이더 등이 있다.

레이더는 1930년대에 군사적인 목적으로 개발되어 그 후 1950년대 후반에 이르러 기상레이더를 가동하기 시작하였다. 1970년대에는 레이더의 에코 신호를 처리하는데 컴퓨터를 이용하게 됨으로써 디지털로 처리하는 획기적인 발전을 이루게 되었으며, 이로 인하여 도플러효과를 이용한 레이더가 출현하게 되었다. 이와 같이 컴퓨터에 의한 자료처리는 1980년대에 이르러서 레이더 에코 자료 처리를 완전히 자동화함으로써 모든 기상 데이터의 실시간 처리가 가능하게 되었고 기상 데이터 또한 강우강도에 따라 색상으로 구분 표시를 함으로써 더욱 쉽게 관정할 수 있게 되었다. 우리나라에 기상레이더가 처음 설치된 것은 1969년 10월 관악산에 설치되어 운영을 시작하여 1988년 6월에 미국 EEC사의 DWSR-88C 도플러 방식의 최신형 레이더가 역시 관악산에 설치되어, 남한 전체를 커버할 수 있는 4개소(부산, 고산, 동해, 군산)에 같은 기종의 기상레이더가 1990년부터 1992년까지 설치되었다. 또한 2000년대에 들어서 백령도와 진도에 최신형 레이더를 설치하여 기상예보에 이용하고 있다. 그러나 최근에는 방재기상에 대한 관심이 높아지면서 댐이나 하천 등의 관리를 위하여 여러 기관에서 기상레이더를 활용하고 있다. 외국의 경우, 일본에서는 전국의 주요하천을 따라 설치된 3,000여 개 소의 무인 및 유인 우량 관측소, 25개

소의 우량 측정 레이더가 설치되어 홍수 방재 대책에 이용되고 있으며, 미국의 경우에는 수문 기상 업무를 총괄하는 미국국립해양대기청 산하의 NWS(National Weather Service)에서 기상위성과 기상레이더 등으로 관측한 강우량 수위, 유량 등의 데이터를 토대로 홍수 등을 예측하고 있다.(이상설, 1997)

기상레이더는 주로 강수현상을 관측하게 되는데 어떤 기상 조건하에서는 이상 탐지 현상이 발생한다. 이는 해상 관측소가 없는 지역에서의 강수유무의 확인을 어렵게 한다. 레이더 전파전파에 영향을 주는 요인은 대기의 기온 역전현상 때문에 생기는 라디오덕트와 불필요한 레이더 에코(echo)로써 발생하는 클러터(clutter)현상이 있다.(O.Sasaki and T.Akiyama, 1982)

본 논문에서는 우리나라 기상레이더에서 관측되는 이상에코의 발생 원인을 규명하고 바람에 따른 해면 클러터의 발생과 형태에 대해 연구한다. 기상레이더의 탐지 거리에 대해 살펴보고, 대기 굴절률에 따른 덕트의 발생과 바람의 영향에 의한 해면 클러터의 특성을 분류한다. 2000년부터 2002년까지의 기상 자료로부터 한반도의 서해상과 남해상에 발생한 이상에코 현상을 규명하고, 그 발생 빈도를 구한다. 이것으로부터 봄철의 기상데이터를 중심으로 이상에코에 대한 특성을 해석한다. 제주의 고산과 백령도 레이더 사이트에 측정된 고층 대기의 기상 자료를 분석하여 대기 상태에 따른 굴절률 지수를 계산하고 고도에 따른 온도와 습도의 변화 정도를 해석하여 이상에코가 발생하는 덕트의 발생 조건을 규명한다. 또한 해면 클러터의 특성을 분류하기 위해 풍향에 따른 클러터의 변화와 풍속에 따른 변화를 해석한다.

본 논문의 각 장의 내용을 요약하면 I장은 본 연구의 배경에 대하여 설명하며, II장은 레이더의 이상에코현상을 서술하고, III장에서는 레이더 클러터현상을 서술한다. IV장에서는 II장과 III장의 이론을 근거로 기상자료 및 기상레이더의 제원을 이용하여 덕트 및 클러터현상을 분석하고 V장에서는 결론을 서술한다.

II. 이상에코의 특성

1. 레이더 방정식

레이더방정식은 레이더의 탐지거리와 송신기, 수신기, 안테나, 목표물 및 주변 특성들간의 관계로부터 얻어지며 레이더에서 목표물까지의 거리를 산출하기 위한 식이다.

송신출력을 P_t 라하고 무지향성 안테나가 사용된다면 송신점에서부터 거리 R 만큼 떨어진 곳에서의 전력밀도(단위면적당 와트)는 다음과 같다.

$$\text{무지향성 안테나의 전력밀도} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (1)$$

레이더는 지향성 안테나를 사용하여 특정방향으로 송신출력 P_t 을 방사한다. 송신이득 G 를 가진 안테나에 의한 전력밀도는 다음과 같다.

$$\text{지향성 안테나의 전력밀도} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2)$$

목표물은 입사되는 전력을 여러 방향으로 재 방사하며, 목표물에 입사된 전력이 레이더 쪽으로 재 방사되는 전력량으로부터 레이더 단면적(RCS), 즉 시그마(σ)가 정의되며, 목표물에 의해 반사되어오는 신호의 전력밀도는 다음과 같다.

$$\text{반사된 에코 신호의 전력밀도} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (3)$$

따라서 레이더 수신안테나의 유효 개구면적을 A_e 라 할 때 레이더 안테나에서 수신되는 반사파의 전력 P_r 은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad A_e = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (4)$$

2. 레이더 최대탐지거리

레이더 최대탐지거리 R_{\max} 는 목표물이 탐지될 수 있는 최대거리로, 이것은 수신된 반사 신호전력 P_r 이 최소탐지신호(MDS) S_{\min} 일 때의 레이더와 목표물사이의 거리이며 수식적인 형태는 다음과 같다.

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right]^{1/4} \quad (5)$$

레이더의 최대탐지거리를 증가시키려면 송신출력 P_t 와 지향성 안테나 이득 G 를 크게 하고, 수신기는 될 수 있는 한 미약한 최저 에코 신호를 검출하도록 하면 최대탐지거리를 증가시킬 수 있다. 그러나 기상레이더에서는 그림 1에서와 같이 지표면이 구형으로 이루어져 있기 때문에 레이더 고도각을 0° 로 하여 관측했을 때 400km의 거리의 탐지고도는 9km가 되어 강수현상이 나타나는 구름의 높이(약 3km이하)에 비해 매우 높기 때문에 기상레이더의 유효 탐지거리는 250km이내가 적정할 것이다.

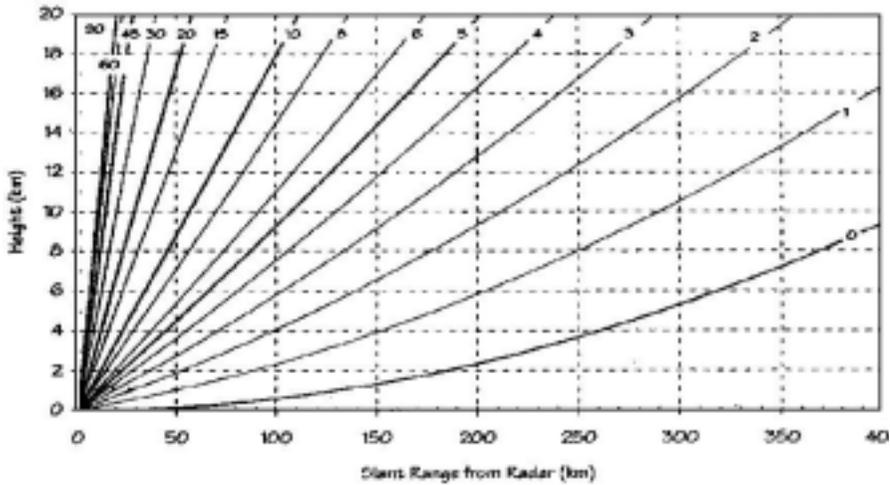


Fig. 1. Detection range and height

3. 대류권 전파



일반적으로 대기의 온도는 지상에서가 높고 고도가 높아짐에 따라 낮아지며 일정한 높이에 도달하면 온도의 하강이 정지된다. 이러한 면을 대류권 계면 (tropopause)이라 하며 지표면에서 대류권계면까지를 대류권(troposphere)이라 한다. 대류권의 두께는 적도지방에서 16Km, 온대지방에서 10~12Km, 극지방에서 9Km정도이나 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 전파상태에 영향을 미치게 된다. 실제로는 이러한 대기요소 중에서 기압은 시간적 변화가 적어 영향을 별로 주지 않으나 기온과 습도는 변화가 크기 때문에 대류권 전파에 커다란 영향을 끼친다. 습도는 보통 상대습도로 나

타내며 상대습도 60%의 대기를 표준대기이라고 한다. 기온은 $0.65^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 정도로 낮아지고 있으나 한랭, 온난전선 등이 있을 경우에는 경계면상에서 급격한 온도의 변화가 나타나며 기타 원인에 의해서도 역전층이 생성될 수 있다. 이외에 전파에 영향을 주는 원인으로서는 대기의 와류 등에 의해 굴절률이 변하게 되어 전파전파에 영향을 미치게 된다.

4. 대류권 내에서의 대기의 굴절률

대기에는 많은 양의 수증기가 포함되어 있고 상대습도는 고도에 따라 점점 감소한다. 즉 대기의 유전율은 수증기의 많고 적음에 커다란 영향을 받는다. 비유전율이 ϵ_{r1} 와 ϵ_{r2} 인 대기층이 연속되어 있을 때 굴절률과의 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (6)$$

여기에서 유전율은 대기중의 상대습도에 의해 커다란 영향을 받는다. 대류권에서 대기의 굴절률을 고려할 때, 기온과 습도가 고도에 의해서만 변화하고 수평방향으로는 변화가 없다고 가정한다면 대기는 서로 다른 유전율을 갖는 대기층이 수직방향으로 무한히 겹쳐 쌓인 것으로 생각할 수 있다. 그림 2에서 굴절률이 n_0 와 n_1 인 두 층이 접해있을 때 입사각과 굴절각의 관계는 스넬(snell)의 법칙에 의하여 다음과 같이 정리된다.

$$n_0 \cdot \sin \beta_0 = n_1 \cdot \sin \beta_1 \quad (7)$$

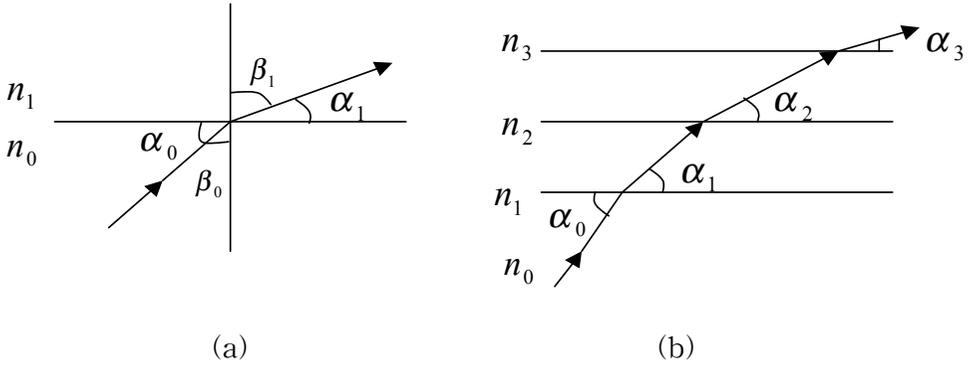


Fig. 2. Snell's law

여기서 β_0 와 β_1 는 전파의 진행방향이 경계면의 법선과 이루는 각이다. β_0 와 β_1 대신 α_0 와 α_1 을 사용하여 스넬의 법칙을 다시 표현해 보면 다음과 같다.

$$n_0 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (8)$$

또한 대기층은 굴절률이 다른 무한한 층으로 연속되어 있는 것으로 가정하였으므로 스넬의 법칙을 일반화하면 식(8)은 다음과 같이 정리된다.

$$n_0 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \cos \alpha_1 = n_2 \cdot \cos \alpha_2 \cdots \quad (9)$$

그리고 굴절률이 계속해서 변할 때 높이의 함수로 표시된 n 과 α 를 사용하여 스넬의 법칙을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$n \cdot \cos \alpha = n_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (10)$$

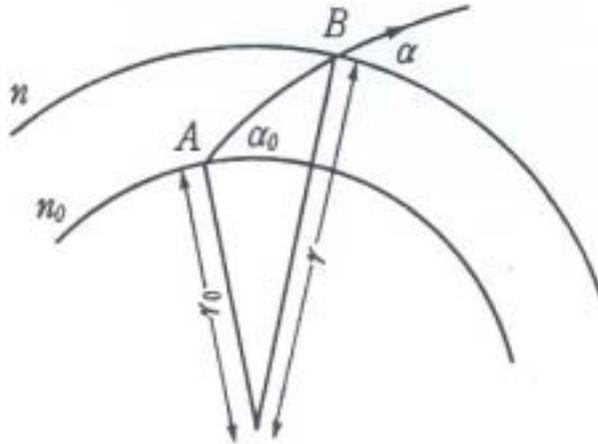


Fig. 3. Propagation's refraction



실제 지구의 지면은 구면이므로 대기층도 구면을 이루고 있어 굴절법칙이 달라지게 된다. 그림 3에서와 같은 하나의 전파통로를 생각하고 그 지표면상의 점 A와 임의의 높이에 있는 B에 관해서 생각하면 스넬의 법칙에 의하여 다음의 식이 성립한다.

$$nr \cos \alpha = n_0 r_0 \cos \alpha_0 \quad (11)$$

여기서, $r = r_0 + h$ 라 하면 식(11)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$n \left(1 + \frac{h}{r_0} \right) \cos \alpha = n_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (12)$$

5. 수정굴절률

지구반경 r_0 는 송신 안테나의 높이 h 에 비해 매우 큰 값이므로 $\frac{h}{r_0} < 1$ 이 성립되며 n 은 $1 < n < 10,000$ 과 같은 범위 내에서 변화하므로 $n(1 + \frac{h}{r_0})$ 는 다음과 같이 근사화된다.

$$n(1 + \frac{h}{r_0}) \doteq n + \frac{h}{r_0} = m \quad (13)$$

여기서 m 을 수정굴절률이라 하며 식(12)을 사용하면 식(13)은 식(14) 또는 (15)와 같이 표현된다.



$$(n + \frac{h}{r_0}) \cos \alpha \doteq n_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (14)$$

$$m \cos \alpha \doteq n_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (15)$$

대기의 실제 굴절률을 수정굴절률로 사용하게 되면 구면 대기층에 대한 스넬의 법칙은 평면대기층에 대한 식(15)와 같이 간단하게 표현된다. 식(15)는 실용상의 단위 10^{-6} 을 취해 표현하면 다음과 같다.

$$M \equiv (n + \frac{h}{r_0} - 1) \times 10^{-6} \quad (16)$$

이러한 수정굴절률을 M 단위(MU , M -unit) 수정굴절률이라 한다. 일반적으로 이를 사용하여 대기의 굴절률을 나타내고 있다. 실제 M 값의 변화는 200~500사이이며 지표면에서 $M_0 = (n_0 - 1) \times 10^{-6}$ 이 된다. 식(16)을 보면 M 은 h 의 함수라는 것을 알 수 있으며 높이 1m당 0.157 MU 의 비율로 커진다. 온대지방에서 표준대기에 대한 굴절률의 높이에 대한 감소율은 실험결과 평균적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dN}{dh} = \frac{dn}{dh} \times 10^6 = -0.039 = -\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{r_0} \times 10^6 \quad [MU/m] \quad (17)$$

또한 M 의 수직높이에 대한 증가율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dh} &= \left(\frac{dn}{dh} + \frac{1}{r_0} \right) \times 10^6 = (-0.039 + 0.157) = \left(-\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_0} \right) \times 10^6 \\ &= \frac{1}{\frac{4}{3} r_0} \times 10^6 \approx 0.118 (M/m) \approx 0.118 (MU/m) \end{aligned} \quad (18)$$

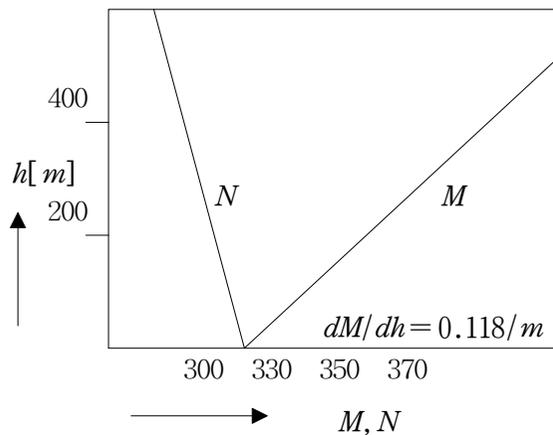


Fig. 4. Variation of M , N

따라서 표준대기에서 임의의 높이에서의 M 값과 지표면의 값 M_0 의 관계는 다음과 같다.

$$M = M_0 + 0.118 h \quad (19)$$

그림 4는 높이에 따른 굴절률의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 전자기파의 전파는 굴절률 n 에 의해 지배받으며, 대기의 굴절률 n 은 대기압, 온도, 수증기압, 그리고 자유전자수에 따라 변한다. 지표면에서의 n 값은 1.0003이다. 높이에 따른 굴절률의 변화는 매우 작지만, 이러한 작은 변화가 빔의 진행경로에 결정적인 영향을 미친다. 따라서 여기에서는 이러한 작은 굴절률의 변화를 더 쉽게 보기 위하여 다음과 같이 N -unit을 사용한다.(Bean and Dutton, 1966)



$$N = (n-1)10^6 = \frac{77.6}{T} (P + 4810 \frac{e}{T}) - 4.03 \times 10^7 \frac{N_e}{f^2} \quad (20)$$

여기서 e 는 수증기압(hPa), P 는 대기압(hPa), T 는 절대온도(K), N_e 는 단위 부피당 자유전자의 밀도, 그리고 f 는 레이더의 주파수(Hz)이다. 식(20)에서 레이더 주파수는 상수 값이며 일반적으로 대류권에서의 자유전자밀도의 효과는 무시할 수 있으므로 N 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

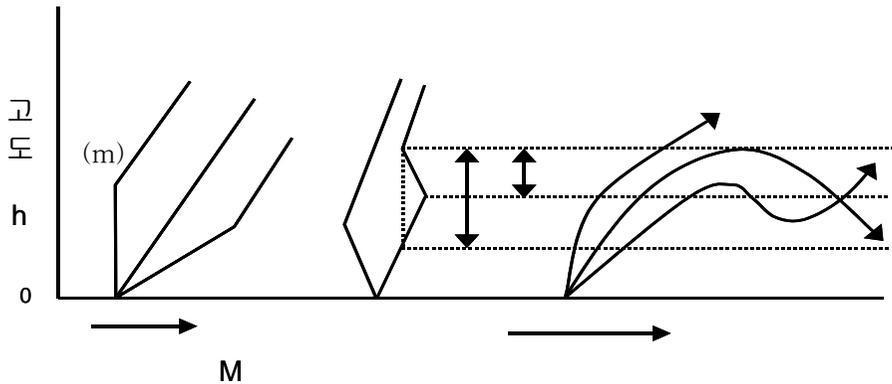
$$N = (n-1)10^6 = \frac{77.6}{T} (P + 4810 \frac{e}{T}) \quad (21)$$

표준대기에서의 N 경도는(dN/dZ) $-39/km$ 이다. 식(21)에서 볼 수 있듯이 대기의 굴절지수(Refractivity : N)는 대기온도(T), 대기압(P), 그리고 수증기압

으로 결정된다. 그러므로 대기상태에 따라 레이더 빔은 지상으로 더 또는 덜 휘어서 진행될 수가 있다.

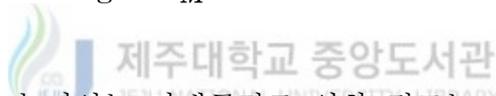
6. 라디오덕트의 발생 및 종류

수정굴절률 M 값의 변화를 높이에 대해 그린 M 곡선에 의해 초단파 통로의 굴절상태를 알 수 있다. 실제의 M 곡선은 그림 5의 5가지 중에서 어느 한 형태이다. 이들 중에서 중요한 것은 고도가 높아질수록 수정굴절률 M 이 감소하는 ④와⑤곡선이다. M 이 감소하는 이유는 어떠한 높이에서 상공으로 올라감에 따라 굴절률 n 이 급하게 감소하기 때문이다. 이런 경우에는 굴절률의 역전층이 생긴다. 역전층에서는 전파통로의 곡률이 지표면의 곡률보다 크므로 층내로 들어온 전파는 습사리 층 외부로 빠져나가지 못하며 층이 널리 퍼져 있으면 전파가 훨씬 먼 거리까지 전파된다. 이러한 현상을 전파의 트래핑(trapping)이라 하며 실제로 전파가 갇힌 층의 두께는 역전층의 두께보다 크며 갇힌 전파는 도파관내를 전파하는 전파와 마찬가지로 층에서 이탈하기가 매우 어렵다. 즉, 이러한 층은 도파관과 같은 역할을 한다고 할 수 있으며 이 대기층을 라디오덕트라고 하며 그림 5의 ④와⑤에 나타나 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 라디오덕트는 M 곡선의 위쪽에 있는 최소점으로부터 내린 수직선과 하부의 곡선이 만나는 점 사이의 공간을 의미하며 덕트에는 2가지 종류가 있다. 그림 5의 ④와 같은 접지성 덕트(ground based duct, surface duct)와 ⑤와 같은 이지성 덕트(elevated duct)가 있다. 덕트의 생성높이는 추울 때 수 m정도 이고 더울 때에는 수 100m~수 1000m이다.



- | | | | |
|---------|--------------|------------|-----------|
| ① 표준형 | $dM/dH=0.12$ | ④ 접지덕트형 | $dM/dH<0$ |
| ② 준 표준형 | $dM/dH>0.12$ | ⑤ 이지S형 덕트형 | $dM/dH<0$ |
| ③ 전이형 | $dM/dH<0.12$ | | |

Fig. 5. *M* curves



지상에 근접하여 놓여있는 과대굴절로 인한 덕트는 지상 덕트 또는 표면 덕트라 부르고, 해수면상에서의 표면 덕트는 증기 덕트라 부른다. 또한 표면 위에 놓여있는 덕트는 엘리베이트 덕트라 부른다. 덕트는 굴절률이 높이에 따라 빠른 비율로 줄어들 때 만들어진다. 만약에 굴절률이 높이에 따라 줄어든다면 온도는 증가되고 습도는 높이에 따라 감소되어야 한다. 높이에 따른 온도의 증가는 온도역전(temperature inversion)이라 부르며, 바다 또는 육지 표면의 온도가 공기의 온도보다 다소 작을 때 발생한다. 온도역전 그 자체는 과대굴절(super refraction)을 만들기 위한 것이다. 덕트는 상층 공기가 지표면 공기와 비교하여 특별히 따뜻하고 건조할 때 발생한다.

과대굴절 덕트를 형성시키는 조건은 다음과 같이 몇 가지가 있다. 지상에서 덕트는 일반적으로 청명한 야간에 지상에서 열이 방출됨으로써 생성된다. 지구는 열을 손실하고 표면 온도가 떨어지지만 상층부 공기의 온도의 변화는 적거나 거의 없다. 이런 경우는 덕트가 발생하기에 좋은 조건 즉, 지상에서의 온

도역전 및 높이에 따른 습도의 급격한 감소가 발생한다. 따라서 지상의 집단 덩트는 야간에 가장 많이 나타나고 통상적으로 주간 중 가장 따뜻한 시기에 사라진다. 또, 다른 덩트의 원인은 육지로부터 온난 건조한 공기가 한랭한 수면위로 이동하는 것이다. 한랭한 바다위의 온난 건조한 공기는 가장 낮은 층에서부터 냉각되어 온도역전이 발생한다. 해상에서의 불규칙 전파의 형태는 바람이 불어 가는 방향으로 더 우세하게 나타나는 경향이 있다. 덩트는 주간 또는 야간 둘 중의 하나에서 발생하고 장시간 지속될 수 있다.

7. 기상조건에 따른 덩트 종류

덩트의 발생원인은 기온 역전현상이고 대기의 굴절률은 온도와 수증기압의 영향을 크게 받는다. 그러므로 대기 상층부가 하층부보다 고온과 낮은 습도임이 필요조건이다. 이와 같은 기온 역전을 일으키는 기상조건에 따라 덩트를 분류해보면 다음과 같다.(Merrill I.Skolinik, 1970)

1) 대양성 덩트

무역풍이 일어나는 대양 상에 발생하는 것으로서 습도는 60~80%정도이고 기온의 역전층은 없다. 이것은 접지성 덩트로서 해안부근에 발생되며 주로 주간에 발생하기 때문에 이러한 덩트는 건조 덩트라고도 한다.

2) 이류성 덩트

해안지대에 발생하는 것으로서 육지와 해상의 기온 차에 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 수십km이상의 거리에서 발생되고 대기의 확산작용에 의하여 감소한다.

3) 전선에 의한 덕트

온화한 기층아래 한랭한 기층이 비스듬히 유입하여 불연속선이 이루어 질 때 이 부근에서 발생하는 덕트로 S형 덕트라 한다. 그러나 바람이나 비를 동반하는 경우에는 대류의 난류 때문에 경계면이 선명하지 못하고 전파전파에 미치는 영향은 없다. 또한 강우의 경우 전파전파는 빗방울에 의한 감쇄를 받게 된다.

4) 야간냉각에 의한 덕트

육상에서 덕트 발생의 원인이 되며 평면지대에서 볼 수 있다. 지면이 파스해지는 낮에는 단열 평형 상태에 가깝다. 그러나 야간에 하늘이 맑고 바람이 별로 없을 때에는 지면의 온도가 내려가면 온도저하와 함께 생기는 이슬 때문에 수증기 압력이 커져서 굴절률 M의 값은 하층부분에서 커지므로 덕트를 발생시키게 된다.

5) 침강성 덕트

침강현상은 높은 곳에서 낮은 곳으로 대량의 공기가 침강하는 현상이다. 고기압의 성질로서 하강하는 공기는 건조하기 많기 때문에 덕트가 발생한다.

8. 과대굴절

빔의 과대굴절은 대기 상태에 따라 레이더 빔이 표준대기상태에서 보다 더 굴곡이 되는 상태이다. 이러한 상황이 발생하면 관측 범위를 확장시키는 결과

를 초래한다. 만약 과대굴절 층이 지표면에 접해 있으면 레이더 관측 범위는 표준상태의 약 150%까지 확장되기도 한다.

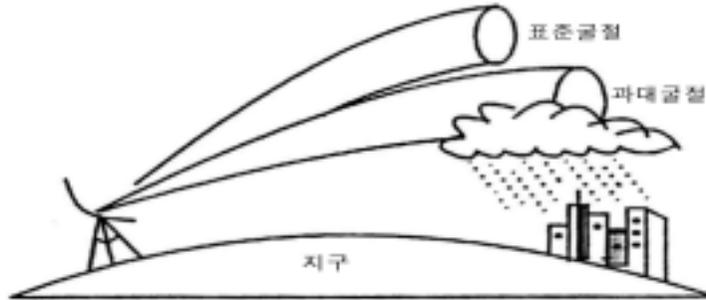


Fig. 6. Kind of refraction

그림 6에 표준굴절된 빔과 과대굴절된 빔의 진행 방향을 나타내었다. 굴절도 N 의 경도가 $-39/\text{km}$ 보다 작으면 과대굴절이 일어나며, 높이에 따른 N 의 감소가 빠를수록 과대굴절의 정도는 더 심해진다. 또한 N 의 경도가 $-157/\text{km}$ 보다 더 작을 경우에는 빔 갇힘 현상이 일어난다. 지표면 쪽으로 급하게 꺾인 빔은 표준상태보다 멀리까지 갇힘 층(trapping layer)내에서 큰 폭으로 진동한다. 아주 드문 경우이지만 레이더 범위는 표준대기 때보다 500%까지 증가될 수 있다. 그러나 갇힘 층이 지표면에 닿아 있으면 아주 먼 거리까지 지형에코가 탐지되어 레이더의 유용성을 저하시키기도 한다.

Ⅲ. 클러터 특성

레이더는 어떤 목표물로부터 반사되어 오는 약한 신호를 검출하여 표적을 탐색 추적하고 그곳까지의 거리를 정확히 알아내는 장치이다. 그러나 목표물을 탐지하는 공간 내에 표적을 탐지하고 추적하는데 많은 방해로 주는 원하지 않는 레이더 에코가 존재한다.

1. 표면클러터

지면 및 해면에 의해 반사된 에코를 표면 클러터라 하고 있고 비나 기타 대기 현상으로 인한 에코를 볼륨 클러터(volume clutter)라 한다. 클러터로부터 후방 산란된 에코는 일반적으로 레이더 단면적보다 레이더 단면적 밀도에 의해 측정되게 된다. 표면 클러터에서 단위 면적당 단면적(σ^0)은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_c}{A_c} \quad (22)$$

여기서 σ_c 는 면적 A_c 에 대한 레이더의 단면적이다.

레이더에 의해 접지각 ϕ 로 표면에 빔이 조사 될 때 빔에 의해 조사되는 면적을 그림 5에 나타내었다.

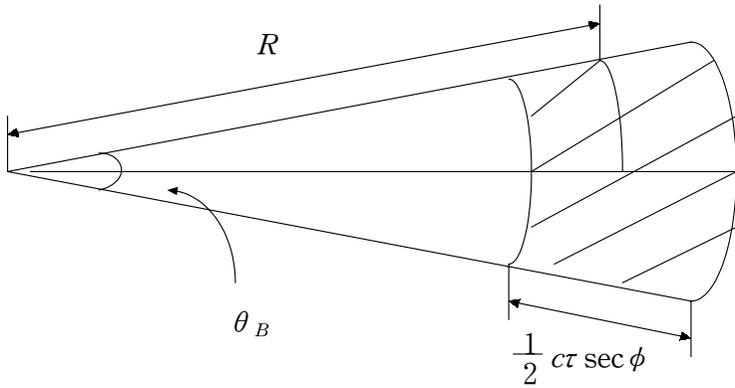


Fig. 7. Geometry of surface clutter

클러터의 면적 A_c 는 레이더 빔 폭 θ_B 가 매우 좁다라고 가정하면 다음 식과 같다.



$$A_c = \frac{1}{2} c \tau \sec \phi R \theta_B \quad (23)$$

여기서 c 는 광속, τ 는 레이더 펄스 폭이고 R 은 레이더 목표물까지의 거리이다. 레이더 공식인 식(23)으로부터 클러터에 의해 수신된 전력 C 는 다음과 같다.

$$C = \frac{P_t G A_e \sigma^0 \theta_B (c\tau/2) \sec \phi}{(4\pi)^2 R^3} \quad (24)$$

따라서 표면 클러터에서 반사된 에코전력은 점 목표물(point target)과 달리 거리의 3승에 반비례하여 변화된다. 유효단면적이 σ_t 인 목표물로부터 반사된 신호전력 S 를

$$S = \frac{P_t G A_e \sigma_t}{(4\pi)^2 R^4} \quad (25)$$

이러 하면, 낮은 접지각인 경우 표면 클러터의 배경 내에 있는 목표물의 신호 대 잡음비(S/N 비)는 식 (24)과 식 (25)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{S}{C} = \frac{\sigma_t}{\sigma^0 R \theta_B (c\tau/2) \sec \phi} \quad (26)$$

최대 탐지거리 R_{\max} 일 때 최소 분별 신호 대 클러터 비율을 $(S/C)_{\min}$ 이라 하면 레이더공식은 다음과 같다.

$$R_{\max} = \frac{\sigma_t}{(S/C)_{\min} \sigma^0 \theta_B (c\tau/2) \sec \phi} \quad (27)$$

여기서 클러터 전력 C 는 수신기 잡음 전력에 비해 매우 큰 것으로 가정한다. 식 (26)에서 거리는 4승이 아닌 1승으로 나타나 있다. 이것은 잡음보다 클러터에 의해 레이더의 최대거리가 더 크게 좌우됨을 나타낸다.

클러터의 특성을 해석하는데 가장 어려운 점은 산란되어지는 물체에 대한 특성을 적절히 표현할 수 있는 방법이 부족하다는 점이다. 바다의 상태는 일차적으로 바람의 세기와 바람이 불었던 시간과 거리 등에 의해 결정된다. 따라서 바람조건이 동일하다면 어느 해상에서나 동일한 결과를 얻을 수 있다. 또한 지면 클러터의 경우 대지의 상태와 주변환경에 따라 클러터 특성이 매우 달라진다.

2. 해상 클러터

바다표면으로부터 반사되는 에코는 파고, 풍속, 바람이 부는 시간 및 거리, 레이더 빔 방향에 대한 파도의 방향, 조수간만의 차이, 바다 물결뿐만 아니라 큰 파도의 존재 및 오염물질의 존재 등에 의해 좌우된다. 해상 에코는 또한 주파수, 편파, 접지각 등과 같은 레이더 성능에 의해 좌우되기도 한다.

단위 면적 당 레이더 목표물의 평균 유효 반사 단면적 σ^0 는 관측각과 해상의 풍속에 따라서도 다르게 나타나고 있다. 따라서 해상의 파고는 해상 클러터의 반사 단면적의 변화로 관측할 수도 있다. 표 1에 파도높이에 따른 바다의 상태를 나타내었다.(Merrill I. Skolnik, 1970)

Table 1. Word Meteorological Organization sea state

해상상태	파도의 높이(m)	파도의 상태
0	0	물결이 잔잔함(투명함)
1	0~0.1	잔잔한 물결(잔물결)
2	0.1~0.5	움직임이 유연함(작은 파도)
3	0.6~1.2	약한 파도
4	1.2~2.4	보통 파도
5	2.4~4.0	거친 파도
6	4.0~6.0	매우 거친 파도
7	6.0~9.0	높은 파도
8	9.0~14.0	매우 높은 파도
9	14이상	극한의 파도

비록 바다의 상태가 레이더 클러터 특징을 설명하기 위한 중요한 요소이지만 언급된 바와 같이 레이더의 해상 에코는 많은 다른 요소들과 관련이 있기 때

문에 바다의 상태만으로 해상 클러터를 결정할 수 없다.

수직 입사 근방의 접지각을 제외하고 σ^0 의 값은 풍속이 증가함에 따라 증가된다. 해상에서 후방 산란된 에너지는 레이더 안테나의 빔 방향에 대한 바람의 방향에 의해 좌우되게 된다. 이것은 일반적으로 레이더 빔이 하향하고 있는 바람이나 측 풍을 대할 때 보다 바람을 정면으로 대할 때 더 높아진다. 수직편파보다 바람에 더 민감하다. 수직입사 또는 근방에서 해상을 바라다볼 경우 후방산란은 평온한 바다에서 가장 크고 바람이 증가함에 따라 감소한다. 약한 백파 현상이 있는 짧은 중력파는 바람에 의해 빠르게 형성되는 관계로 보다 높은 주파수에서 σ^0 의 값은 바람조건에 따라 달라진다. 또한 높은 파도는 형성되어 포화되는데 상당한 시간을 필요로 한다. 따라서 바람이 불고 있는 시간과 거리를 고려하지 않는다면 바람 자체만으로는 바다상태에 대해 올바른 해석을 하지 못한다.



IV. 기상자료분석

이상에코현상의 발생조건은 여러 요인이 있으나 주로 일정 고도의 대기에서 상층부가 하층부보다 고온이고 급격한 습도의 감소가 나타날 때 나타난다. 이 경우에는 수정굴절률 M곡선이 급격하게 감소하여 굴절률의 역전층이 만들어진다.

Table 2. Spec. of radar

해당 레이더 사이트		고 산, 부산	백령도	
송신기	출력관	Magnetron	Klystron	
	주파수(MHz)	5,340	5,637	
	Peak power(KW)	250KW	250KW	
	Pulse width	short	0.83 μ s	1 μ s
		long	2 μ s	2-10 μ s
	PRF	short pulse	1,180HZ	250~2,000HZ
		long pulse	250HZ	250~2,000HZ
점유주파수 대역폭	약10.75M	8M		
수신기	Dynamic range	80dB	80dB	
	중간주파수	30MHz	20MHz	
안테나	안테나 직경	3.6m	4.3m	
	Beam width	1.2°	1°	
	안테나 이득	43dB	44dB	

본 논문에서는 표 2 제원의 기상레이더에 의해 관측되어진 240km범위의 레이더 합성영상과 위성 합성영상과 비교하여 강수현상이 없는 날 중에서 고산 및 백령도기상대를 중심으로 이상에코현상이 나타난 날을 조사하였다. 또한 조사된 날의 고층기상자료를 분석하였다. 이 고층기상자료는 고산기상대와 백령도기상대에서 1일 2회(09시, 21시) 기압, 기온, 습도 등의 센서를 장착한 라디오존데를 비양하여 대기권 약 35km까지의 대기를 관측하여 지상으로 송신된 자료이다. 대기전도는 기온과 노점온도를 고도별로 나타내어 대기의 연직구조를 알 수 있다. 또한 굴절률과 굴절지수를 산출하여 과대굴절현상에 의해 이

상에코현상이 발생하는 특징을 분석하였다.

한편 비교적 해상 클러터현상이 잘 나타나고 있는 부산 레이더를 이용하여 다른 풍향에서의 클러터 특성과 같은 풍향에서 풍속에 따른 해상 클러터의 특성에 대하여 분석하였다.

1. 기상분석

표 3에는 고산기상대의 2000년에서 2002년까지의 날씨변화에 따른 일 수를 나타내었다. 강수 일 수는 매년 128~139일 정도로 년 중 35%가량이 비가 오는 날이며, 맑거나 구름조금 끼는 날은 년 중 39%로 나타났다. 이중 이상에코현상이 나타난 날은 35일로, 맑거나 구름조금 낀 날씨의 8.3%가량으로 나타나고 있다. 이때, 맑은 날은 하늘을 전천 10할로 분류하여 구름이 2할 이하, 구름조금은 구름이 3~5할, 구름 많음은 구름이 6~8할, 흐린 날은 9~10할로 분류하였다.

Table 3. The number of days in each phenomena(Gosan) (day)

년 구분 월	2000					2001					2002				
	맑음	구름 조금	구름 많음	흐림	강수	맑음	구름 조금	구름 많음	흐림	강수	맑음	구름 조금	구름 많음	흐림	강수
1	1	3	4	23	16	1	3	11	16	15	7	3	10	14	14
2	1	10	6	12	8	1	7	7	13	10	9	10	4	5	6
3	8	9	7	7	9	4	9	8	10	8	5	9	5	12	10
4	5	9	5	11	9	9	9	5	7	9	2	4	5	19	13
5	6	9	5	11	11	1	9	6	15	10	3	4	2	22	14
6	4	3	1	22	16	-	4	6	20	16	6	5	7	12	7
7	1	12	6	12	8	4	9	7	11	11	1	2	10	18	17
8	1	17	3	10	17	1	14	7	9	14	4	6	5	16	16
9	4	9	4	13	13	9	9	5	7	6	9	11	5	5	6
10	4	7	7	13	9	6	9	7	9	9	7	9	4	11	7
11	7	8	6	9	7	8	9	8	5	9	5	7	9	9	11
12	7	9	10	5	5	-	5	6	20	16	2	3	6	20	18
계	49	105	64	148	128	44	96	83	142	133	57	73	72	163	139

표 4에는 백령도기상대의 관측 시작 년도인 2001년에서 2002년까지의 기상현상 일 수를 나타내었다. 강수 일 수는 99일과 90일로 나타났다.

Table 4. The number of days in each phenomena(Baekryeongdo) (day)

년 구분 월	2001					2002				
	맑음	구름 조금	구름 많음	흐림	강수	맑음	구름 조금	구름 많음	흐림	강수
1	1	8	12	10	17	6	9	10	6	6
2	3	13	6	6	4	9	11	3	5	-
3	6	11	8	6	6	11	7	8	5	8
4	6	12	4	8	2	8	12	4	6	8
5	9	8	6	8	5	11	5	3	12	7
6	5	5	5	15	13	10	6	5	9	9
7	4	6	5	16	17	1	8	6	16	17
8	8	8	9	6	6	2	5	9	15	11
9	12	9	5	4	6	9	8	7	6	4
10	7	14	2	8	6	3	11	11	6	8
11	12	9	8	1	8	1	11	13	5	7
12	5	5	17	4	9	1	12	5	13	5
계	78	108	87	92	99	72	105	84	104	90

표 5에는 2000년부터 2002년까지 우리나라 서해상과 남해상에서 매일 09시의 레이다 합성영상을 분석하여 이상에코현상이 나타난 횟수를 나타내었다. 표 5에서 나타나듯이 이상에코는 주로 봄철에 많이 나타나고 있다. 그 이유는 봄철에 많이 나타나고 있는 고온건조한 양자강기단이 한랭한 서해상의 수면위로 이동하여 온난 건조한 대기가 습하게 변질되어, 기온역전에 의한 습도의 급격한 변화에 따른 대기의 굴절률 변화가 심하게 나타나기 때문이다.

Table 5. The number of days in the abnormal echo (day)

년 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
2000	-	-	3	5	4	3	-	-	-	-	-	-	15
2001	-	-	-	3	5	3	-	-	-	-	-	-	11
2002	-	-	1	2	1	4	-	-	1	-	-	-	9

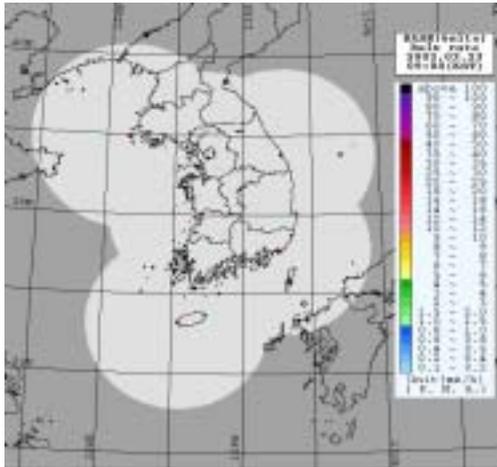
2. 대기상태 분석

대기상태를 분석하기 위해 그림 8에서 그림 13에 이상현상이 없는 날과 이상현상이 있는 날에 대한 레이더 합성영상과 위성 합성영상을 각각 나타내었으며, 그 날의 고층기상자료에 의해 높이에 따른 굴절률과 기온변화와 고도에 따른 굴절지수, 고도에 따른 기온과 노점온도의 변화를 그래프로 나타내었다.

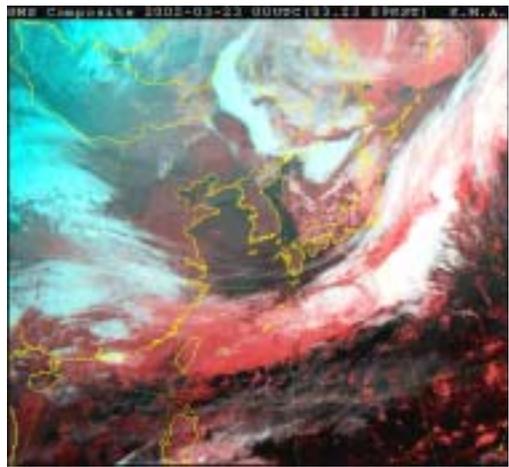
1) 맑은 날 이상에코 현상이 없는 경우

그림 8은 2002년 3월 23일 사례로 그림 8(a)의 레이더 영상에는 서해상과 남해상을 중심으로 강수에코 및 이상에코가 전혀 나타나지 않고 있음을 보이고 있으며, 또한 그림 8(b)의 위성 합성영상에서 구름이 없는 날임을 알 수 있다. 그림 8(c)에서는 고도에 따른 기온과 굴절률의 변화를 나타내고 있다. 고산기상대의 고층기상자료에서 굴절지수를 그림 8(d)에 나타내었으며, 대기상태를 그림 8(e)에 나타내었다. 굴절지수의 변화를 고도별로 살펴보면 925m에서 굴절지수가 $-131/\text{km}$ 로 다소 낮게 나타나고 있지만, 그림 8(e)에서 그 지점의 습도는 감소하고 있으나 기온역전은 나타나지 않고 있다. 1598m에서 굴절지수는 $-158/\text{km}$ 로 낮게 나타나고 있으나 기온변화의 뚜렷한 역전현상은 나타나고 있지 않고, 습도의 변화 또한 작게 나타나고 있다. 그리고 2930m의 대기층의 기온은 -13.7°C 로 3365m까지 -10.5°C 로 3.2°C 상승함으로써 기온역전이 일어나고 있으나, 습도의 변화는 계속 일정하게 감소하면서 과소굴절을 나타내고 있다.

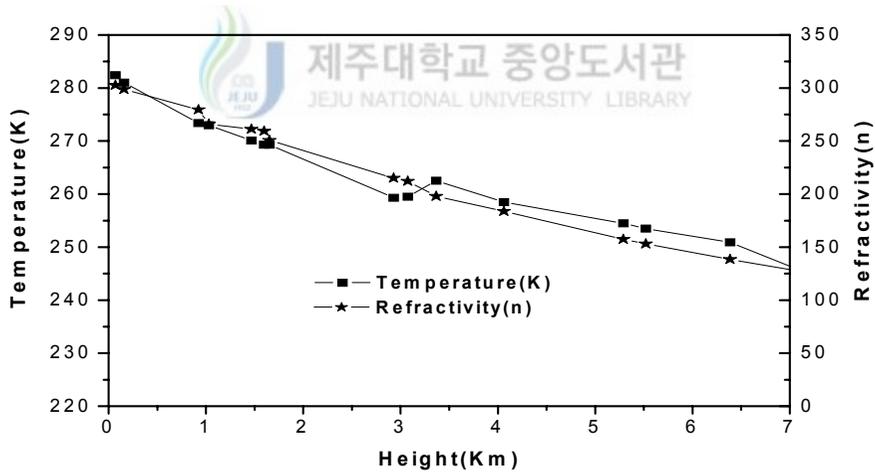
이 날의 기상을 살펴본 결과 굴절지수가 변화하고 있으나 3개 고도에서 온도와 습도의 변화가 덩트를 형성하는 조건에는 만족하지 못하므로 이상에코가 발생하지 않았다.



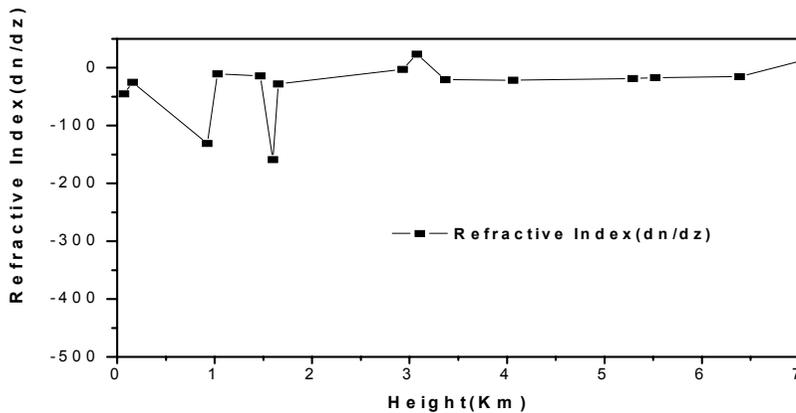
(a) Radar image



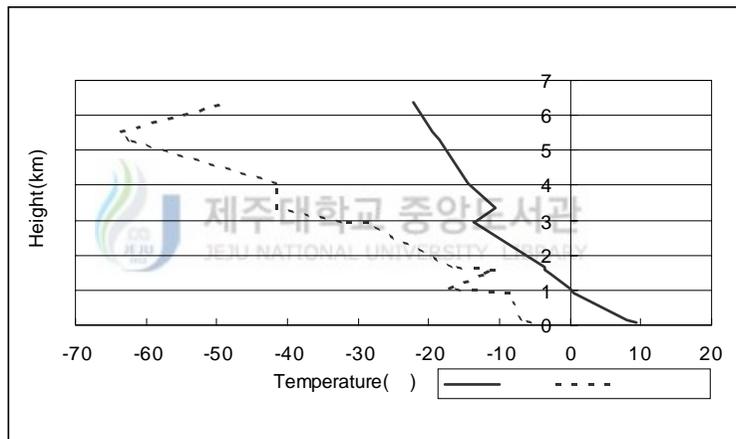
(b) Satellite image



(c) Temperature and refractivity according to height



(d) Refractive index of height



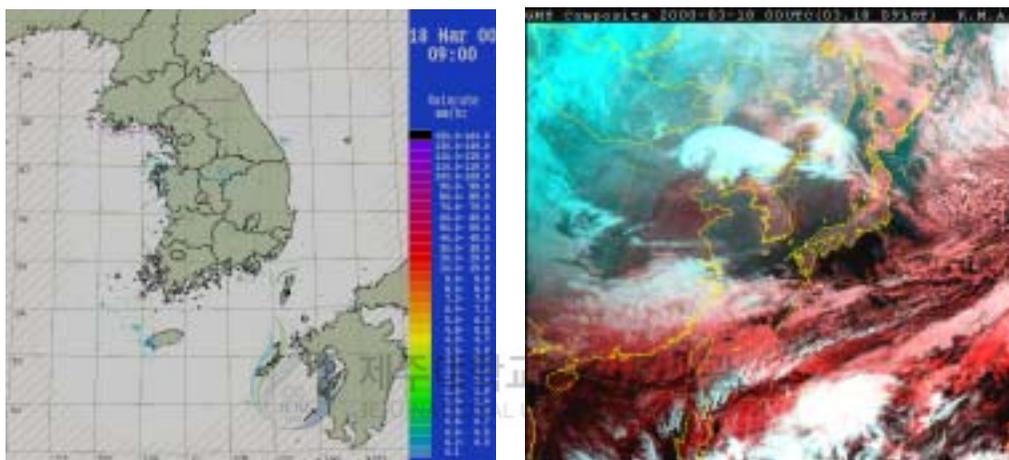
(e) Sounding of temperature and dew-point temperature.

Fig. 8. Case of 0900KTC 23 March 2002.

2) 맑은 날 하층에 의한 이상에코현상이 있는 경우

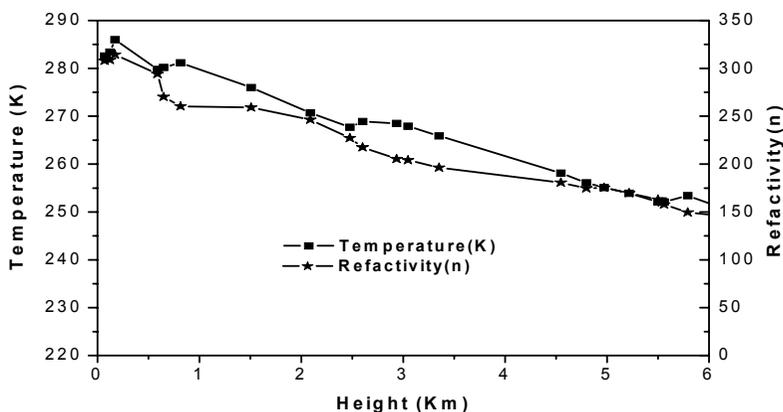
그림 9는 2000년 3월 18일의 기상자료로서 그림 9(a)의 레이더 합성영상에서 동경 126°에서 127°와 북위 33.5°에서 34.5°사이에서 에코가 나타나고 있다. 그림 9(b)에서 제주도 남쪽에서 중국 화남지방까지 길게 두터운 구름이 끼어 있고 제주도 북서쪽으로 낮은 구름이 나타나고 있으나 비구름은 아닌 것으로 판단되어 그림 9(a)의 레이더에코는 이상에코로 판단된다. 그림 9(c)는 기온과

굴절률의 변화를 나타내고 있다. 이 날의 고산기상대의 고층기상자료에 의한 굴절지수를 그림 9(d)에 나타내었으며 대기선도를 그림 9(e)에 나타내었다. 그림 9(e)에서 기온역전현상이 171m, 589m, 5540m에서 발생하고 있으며, 또한 습도도 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9(d)에서 굴절 현상은 589m, 2480m, 5540m층에서 발생되고 있으며 589m층에서 굴절지수가 $-398/\text{km}$ 로 과대굴절현상이 나타나고 있다. 따라서 위에서 분석한 대기 상태들을 고려하였을 때 589m층에서 이상에코현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

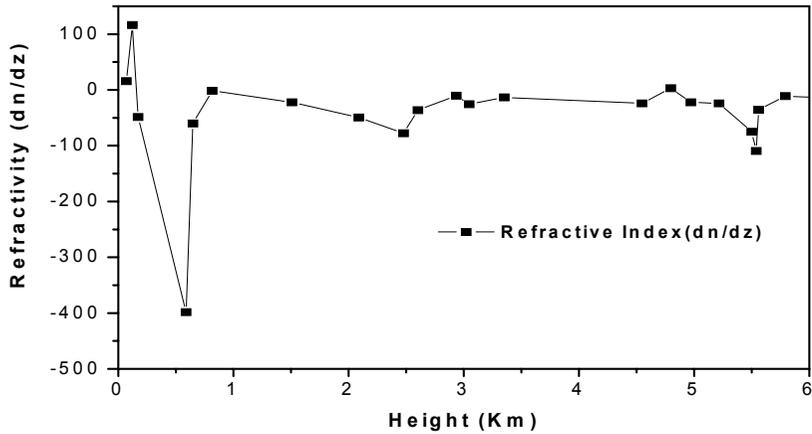


(a) Radar image

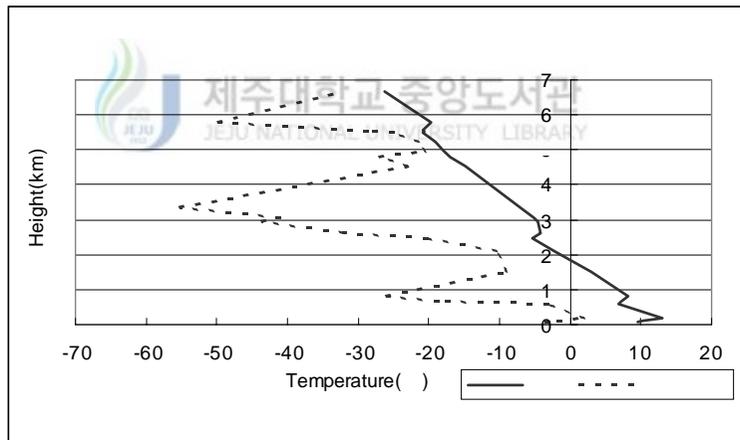
(b) Satellite image



(c) Temperature and refractivity according to height



(d) Refractive index of height

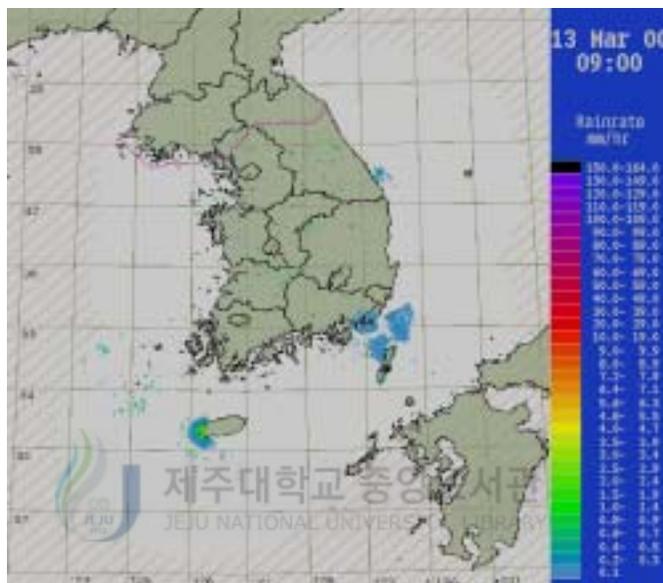


(e) Sounding of temperature and dew-point temperature.

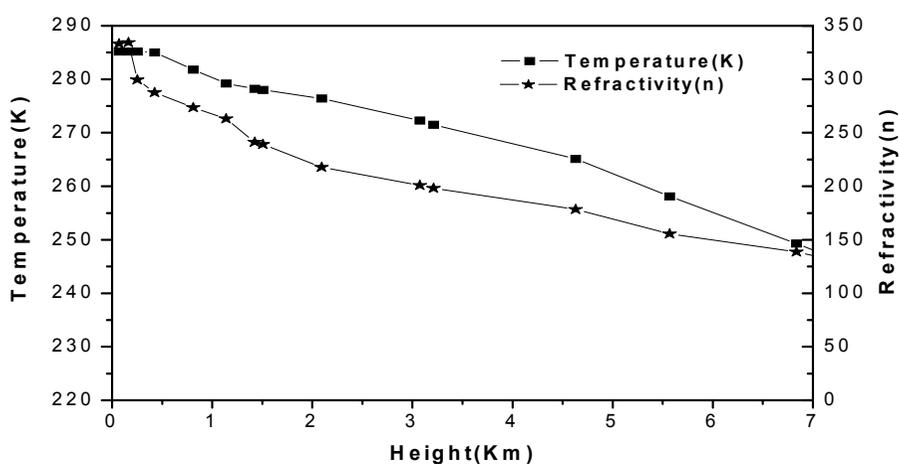
Fig. 9. Case of 0900KTC 18 March 2000.

그림 10은 2000년 3월 13일 09시 기상자료로서 그림 10(a)의 레이더 합성영상에서 동경 126°, 북위 34°의 부근을 중심으로 이상에코가 나타나고 있으며 고산레이더사이트에서는 해상 클러터가 나타나고 있다. 고산기상대의 고층기상자료의 굴절지수와 대기선도를 그림 10(c),(d)에 각각 나타내었다. 그림

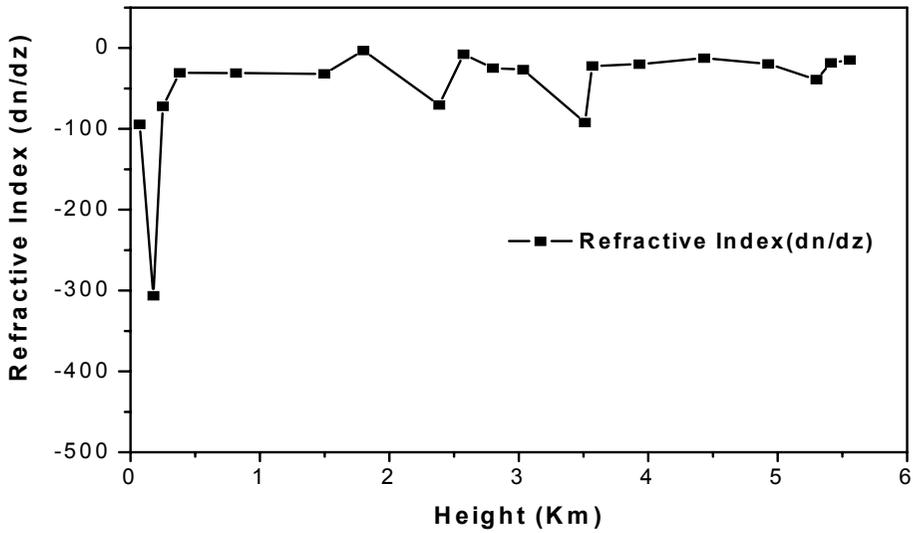
10(d)에서 기온역전현상은 178m, 2485m, 3510m, 5230m의 대기층에서 나타나고 있으며 습도의 급격한 감소는 178m에서 나타나고 있다. 그림 10(c)에서 굴절지수는 178m에서 $-306/km$ 로 과대굴절현상이 나타났다. 따라서 178m에서 기온, 습도 및 굴절지수 모두 이상에코현상을 발생할 수 있는 조건을 만족하고 있다.



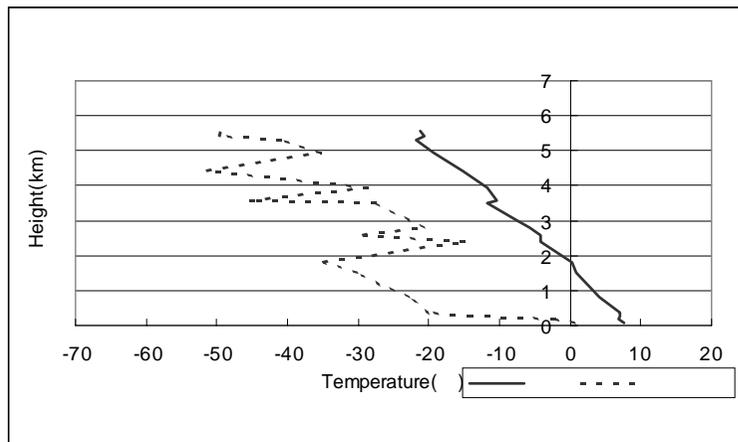
(a) Radar image



(b) Temperature and refractivity according to height



(c) Refractive index of height
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



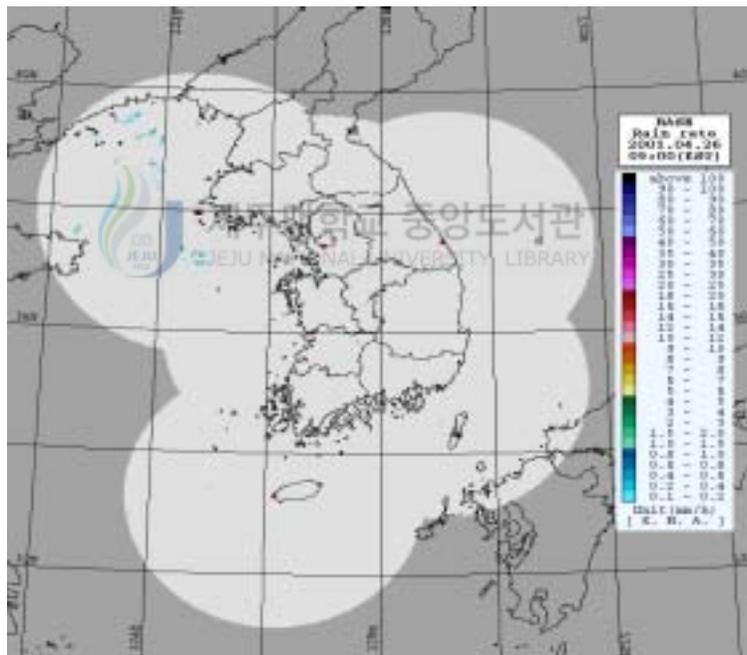
(d) Sounding of temperature and dew-point temperature.

Fig. 10. Case of 0900KTC 13 March 2000.

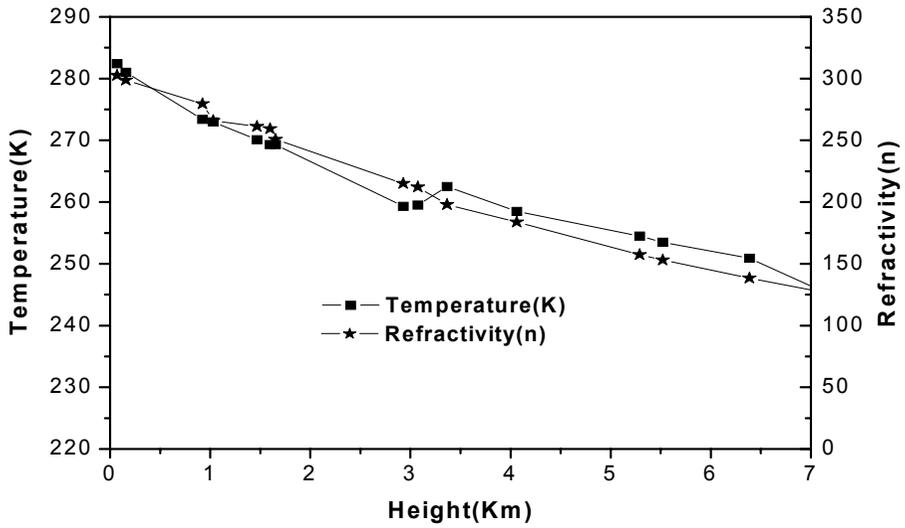
그림 11은 2001년 4월 26일 09시의 기상자료이다. 그림 11(a)의 레이더 합성

영상에서 동경 126°, 북위 34°의 부근을 중심으로 점 형태의 이상에코가 나타나기 시작하였고 산둥반도 북쪽에서는 점차 강수에코가 나타나고 있다. 고산 기상대 고층기상자료의 그림 11(d)의 163m에서 기온역전현상이 일어나고 습도가 높으며, 163m층에서 굴절지수가 -386/km로 기온, 습도 및 굴절지수 모두 이상에코현상을 발생할 수 있는 조건을 만족하고 있다.

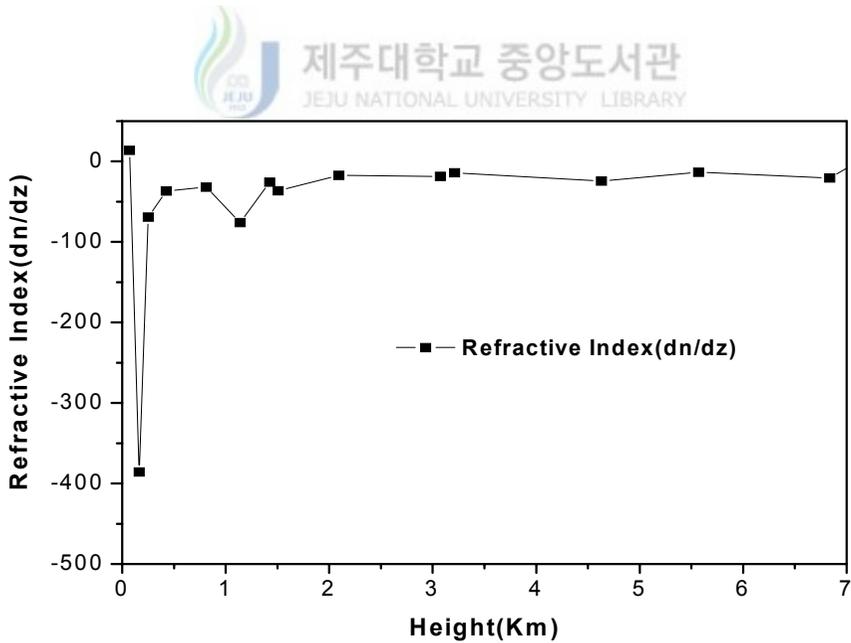
지금까지의 하층대기에서의 이상에코현상이 나타날 조건은 기온 역전층에서 습도가 급격히 감소하면서 과대굴절 현상이 굴절지수가 -158/km이하에서 나타났다.



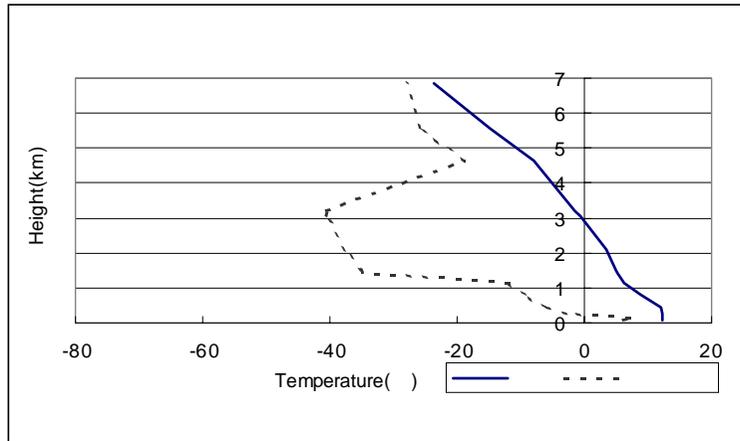
(a) Radar image



(b) Temperature and refractivity according to height



(c) Refractive index of height

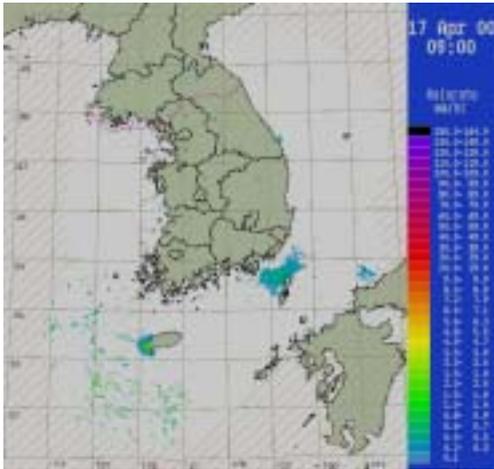


(d) Sounding of temperature and dew-point temperature.

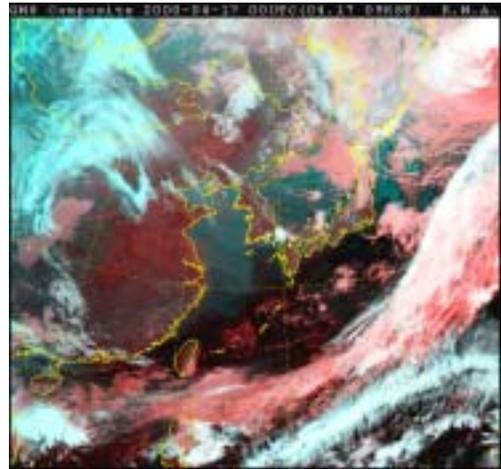
Fig. 11. Case of 0900KTC 26 April 2001.

3) 맑은 날 상층에 의한 이상에코현상이 있는 경우

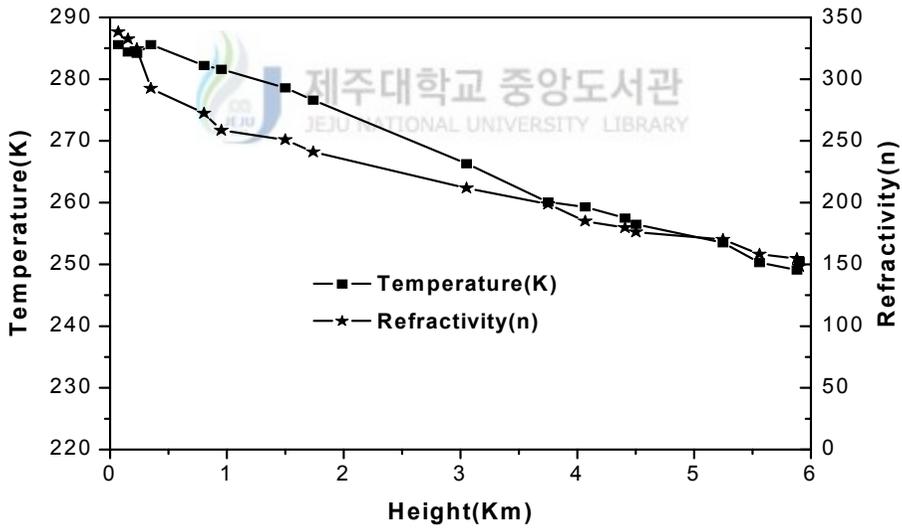
그림 12는 2000년 4월 17일 09시 기상자료이다. 그림 12(a)의 레이더 합성영상에서 동경 124°~127°와 북위 31°~34°사이에서 폭넓게 에코가 나타나고 있다. 그림 12(b)에서 위성 합성영상을 분석했을 때 서해상과 남해상에는 맑은 날씨를 보이고 있으며, 따라서 레이더 합성영상에서 나타나고 있는 에코는 이상에코로 판단된다. 고산기상대의 고층기상자료를 분석해 보았다. 그림 12(e)의 229m대기층과 5880m에서 기온역전현상이 나타나고 있으며 습도는 두 층 모두 감소하고 있다. 그림 12(d)에서 229m에서 굴절지수는 $-270/\text{km}$ 이며, 5880m의 대기층에서 굴절지수는 $-317/\text{km}$ 으로 2개층 모두에서 굴절지수가 $-150/\text{km}$ 보다 낮게 나타나면서 이상에코현상이 나타날 조건을 만족하고 있다.



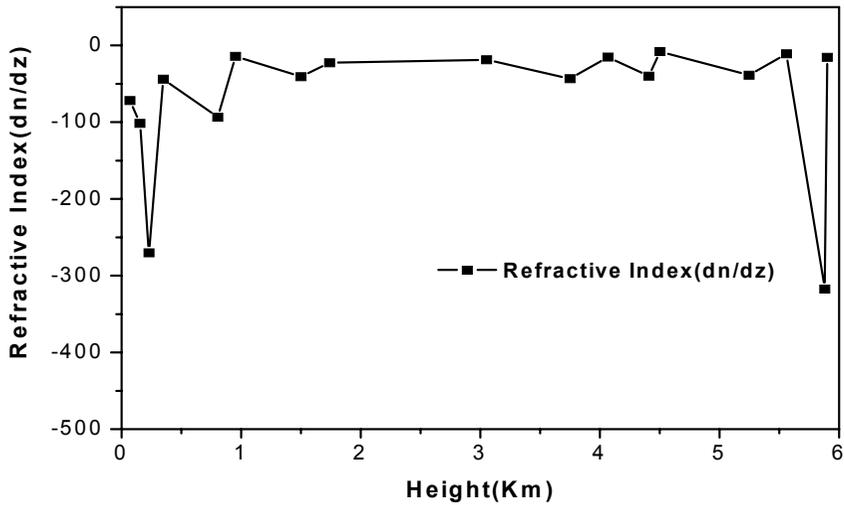
(a) Radar image



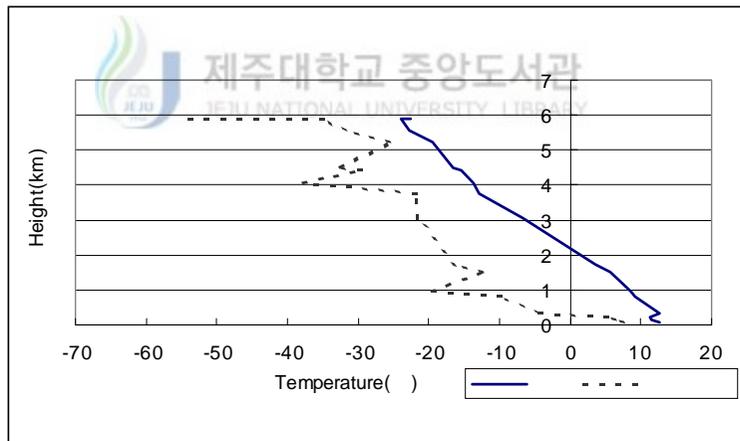
(b) Satellite image



(c) Temperature and refractivity according to height



(d) Refractive index of height

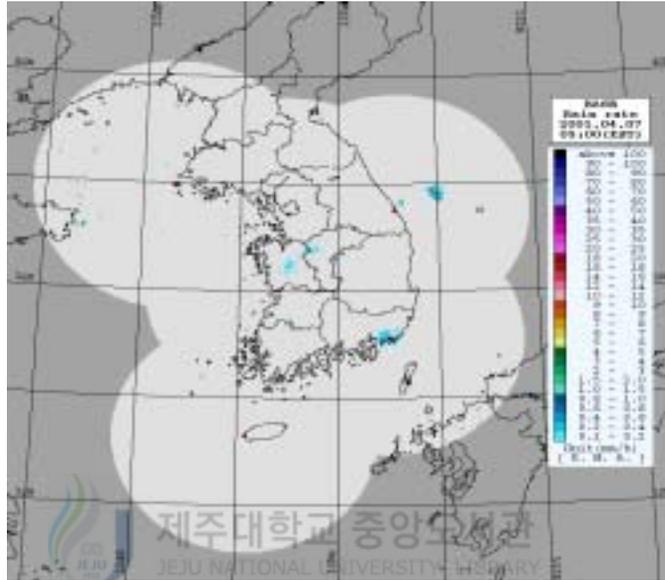


(e) Sounding of temperature and dew-point temperature.

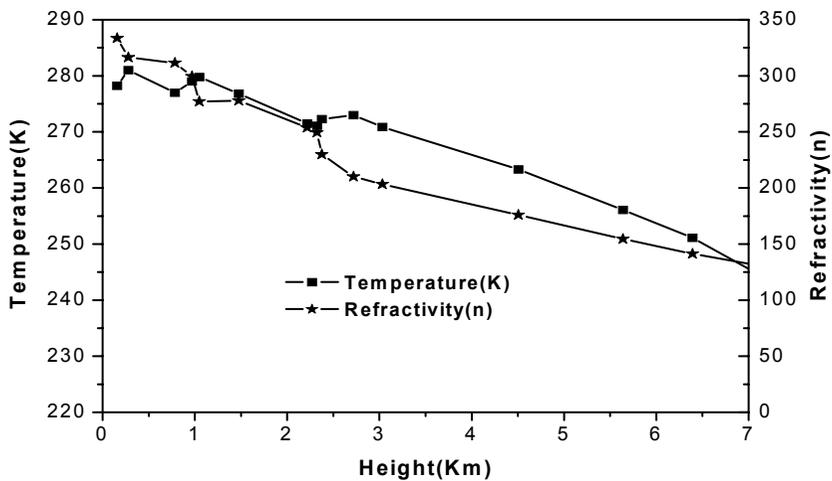
Fig. 12. Case of 0900KTC 17 April 2000.

그림 13은 2001년 4월 7일 09시 기상자료이다. 그림 13(a)의 레이더 합성영상에서 산동반도 해역에서 에코현상이 나타나고 있으나, 위성 합성영상을 분석했을 때 강수에코가 아닌 이상에코현상이다. 백령도기상대의 고층기상자료를 분석해 보았다. 그림 13(d)의 969m, 2325m의 대기층에서 기온역전현상이 나타

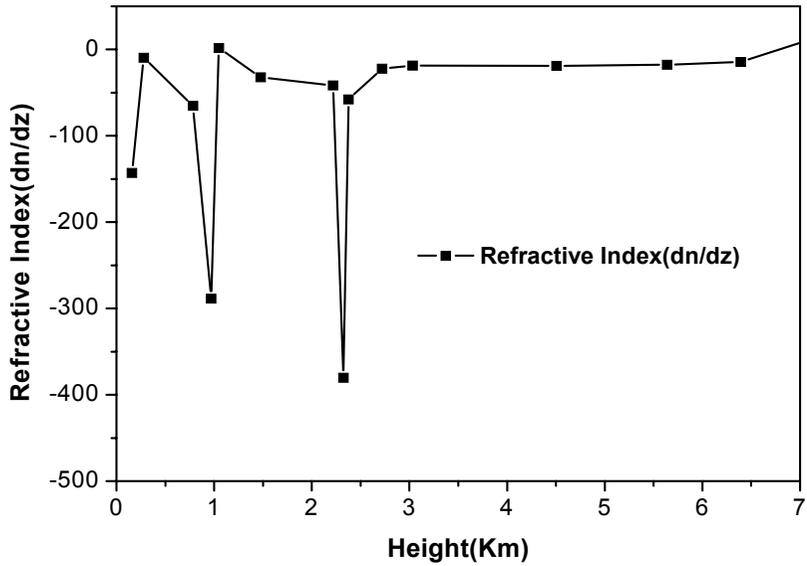
나고 있으며 2325m에서 습도의 급격한 감소현상이 나타나고 있다. 그림 13(c)에서 969m의 굴절지수는 $-288/\text{km}$ 이며 2325m의 굴절지수는 $-380/\text{km}$ 로 과대 굴절이 나타나고 있다. 따라서 기온, 습도 및 굴절지수 모두 이상에코현상을 발생할 수 있는 조건을 만족하고 있다.



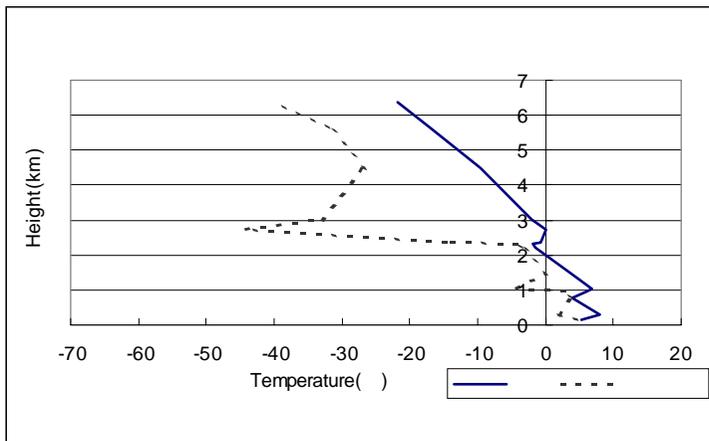
(a) Radar image



(b) Temperature and refractivity according to height



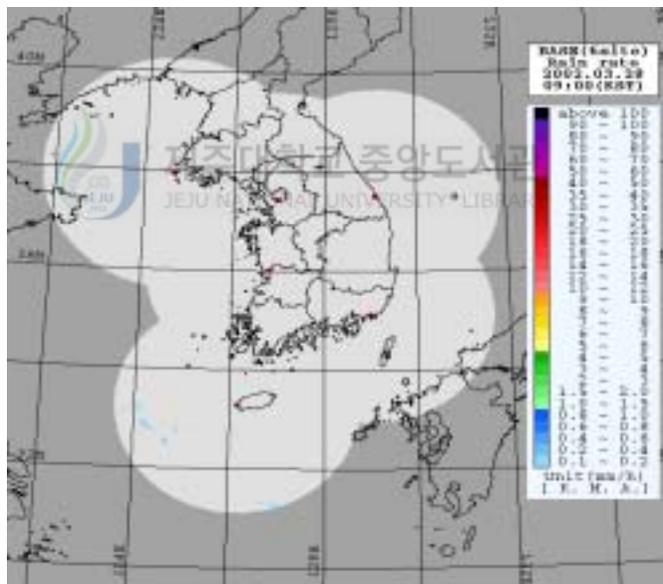
(c) Refractive index of height
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



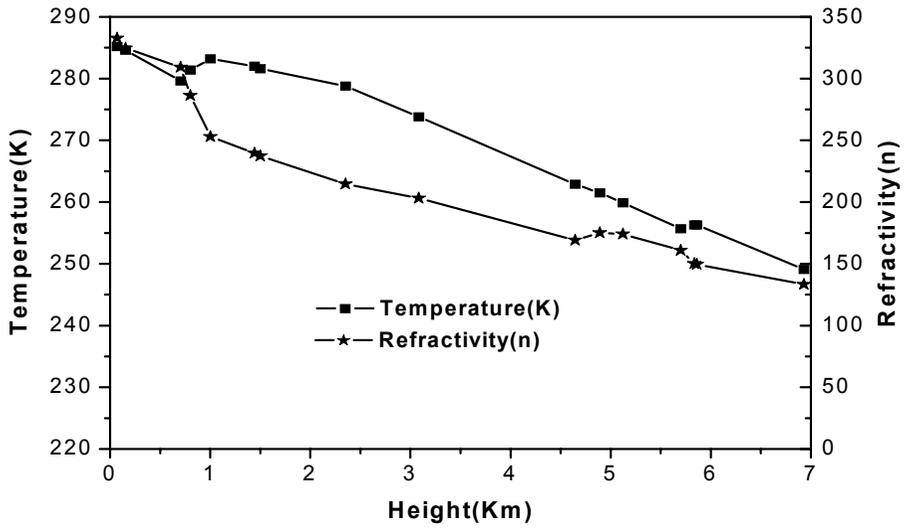
(d) Sounding of temperature and dew-point temperature.

Fig. 13. Case of 0900KTC 7 April 2001

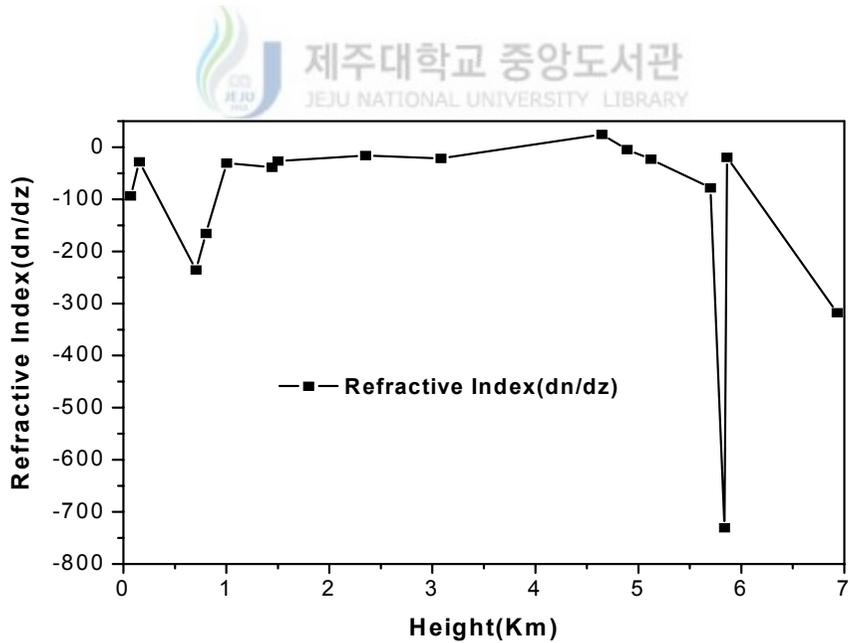
그림 14는 2002년 3월 28일 09시 기상자료이다. 그림 14(a)의 레이더 합성영상에서 동경 124°, 북위 33°의 제주도남서쪽 약 200km해상에 에코가 나타나고 있다. 위성 합성영상 등을 분석했을 때 강수에코가 아닌 이상에코현상이다. 그림 14(d)에서 704m, 5837m에서 기온역전현상이 나타나면서 습도도 급격히 감소하고 있다. 그림 14(c)의 704m층의 굴절지수는 $-236/\text{km}$ 이고, 5837m의 굴절지수는 $-730/\text{km}$ 로 과대굴절현상이 나타나고 있다. 따라서 이상에코현상이 발생 할 수 있는 조건을 만족하고 있다. 이 사례는 남해상의 해수면에 의한 이상에코현상이 나타나고 있으며, 기온감율에 의한 습도의 변화에 따른 굴절률의 변동은 상층에서 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다.



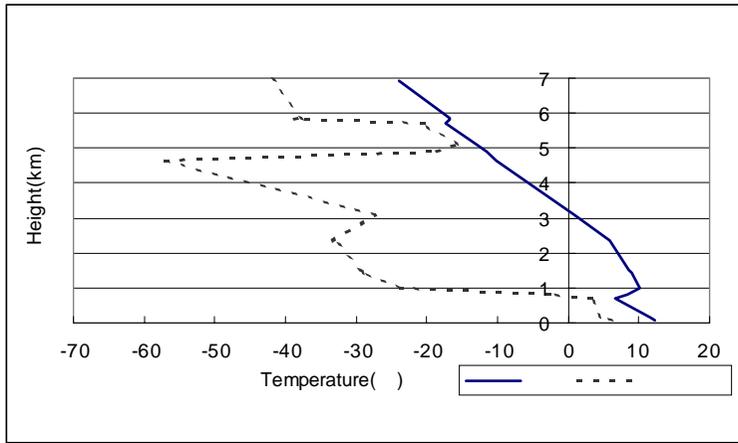
(a) Radar image



(b) Temperature and refractivity according to height



(c) Refractive index of height



(d) Sounding of temperature and dew-point temperature.

Fig. 14. Case of 0900KTC 28 March 2002.

3. 해상 클러터 분석



해상 클러터는 파도에 의해서 반사되어 돌아온 빔으로, 잡음의 일종이다. 그러나 그 특징을 이용하면 많은 정보를 얻을 수 있다. 파도는 해안에 접근하면서 높아지기 때문에 해안선의 방향에 따라 해상 클러터의 모양이 달라진다. 파고가 높아지기 위해서는 지속적인 바람이 필요하기 때문에 일반적으로 바람과 파고가 진행되는 방향은 일치하는 경우가 많다. 따라서 클러터의 모양에 따라 풍향과 파도의 진행방향을 알 수 있다. 또한 클러터의 강도에 따라 파고의 높이도 알 수 있으나 지형, 풍향 및 풍속 등에 따라 많은 변수가 있으므로 레이더가 설치된 지역이나 주위환경에 따라 레이더 클러터의 강도가 다를 수 있다. 풍향에 따른 해상 클러터의 특징을 조사하면 레이더 방향의 해안 쪽으로 부챗살 모양의 해상 클러터가 나타나는데 대체적으로 바람이 불어오는 쪽으로 부챗살 모양이 뚜렷하고 강한 클러터가 나타난다.

본 논문에서는 비교적 해상 클러터현상의 특성이 두드러지게 나타나는 부산 레이더사이트에서 관측된 사례 중에서 비슷한 풍향에서의 클러터현상과 풍속

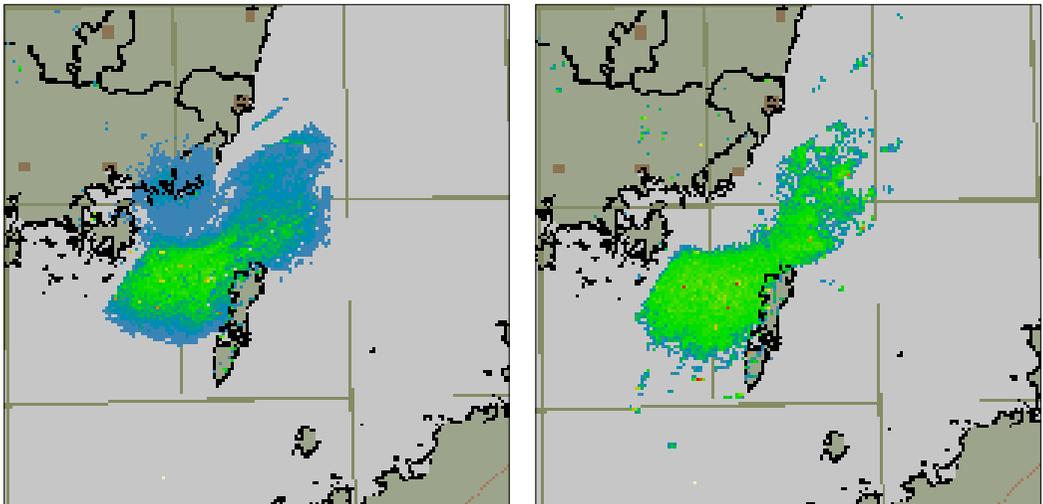
의 차이에 따른 클러터현상을 각 2건씩을 선택하여 비교 분석하였다.

1) 풍향에 따른 클러터특성

Table 6. Wind direction and speed in case of different wind direction

2001.3.15			2000.4.11		
시간	풍향	풍속(m/s)	시간	풍향	풍속(m/s)
03h	W	6.4	19h	SSW	5.0
04h	W	4.8	20h	SSW	3.7
05h	WNW	3.9	21h	SW	4.3
06h	NNW	2.2	22h	SW	6.0

표 6의 2001년 3월 15일의 사례는 03시에 풍향이 서풍 풍속이 6.4m/s에서 05시에 풍향이 서북서풍 풍속 3.9m/s로 불면서 풍향과 풍속이 약간 변화하고 있으며, 2000년 4월 11일의 사례는 풍향이 남남서풍이 5.0m/s에서 남서풍이 4.3m/s로 풍속은 비슷하지만 풍향이 서풍을 경계로 서북서풍과 남서풍으로 풍향이 다른 사례의 해상 클러터현상을 그림 15에 나타내었다.



(a) Sea clutter image(2001. 3. 15 05h) (b) Sea clutter image(2000.4.11.21h)

Fig. 15. Radar images

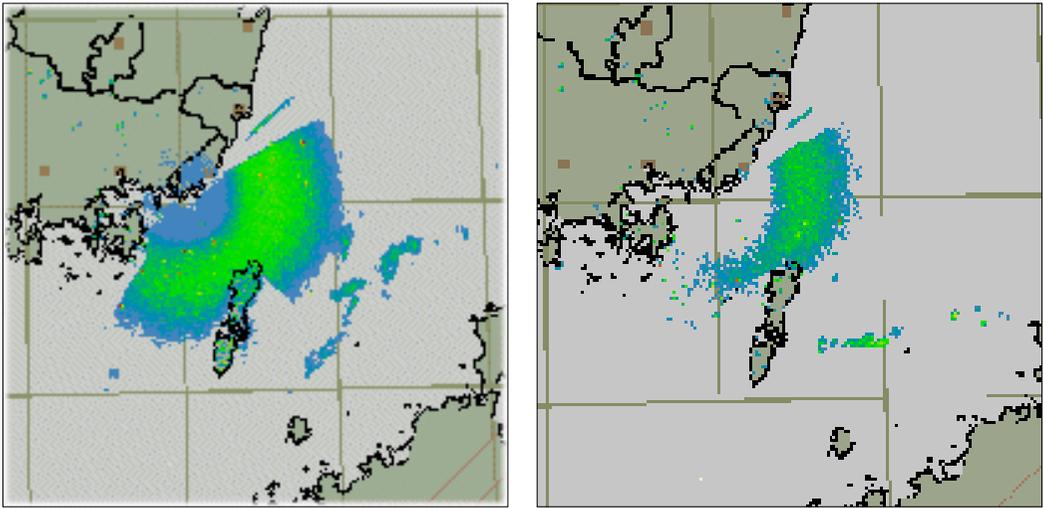
그림 15 (a)에서는 서풍류의 풍향에서의 해상 클러터를 나타내고 있다. 서풍에서의 해상 클러터의 특징은 레벨2의 강도 에코는 대마도 서쪽까지 나타나고 있으며 레벨1은 레이더사이트의 반대편까지 폭넓게 나타나고 있다. 바람이 불어오는 방향에서 강한 해상 클러터현상이 나타나고 있다. 그림 15(b)에서는 남서계열의 풍향으로 그림 15(a)사례는 서풍에서 육상에 의한 바람의 감속으로 해상에서 클러터 강도가 그림 14(b)에 비해 낮게 나타나고 있다. 반면에 그림 15(b)의 경우는 바람이 육상에 마찰 없이 직접 해상의 파도에 영향을 주면서 클러터 대부분이 레벨2의 강도를 보이면서 남서풍 쪽으로 부챗살 모양의 클러터가 강하게 나타났다.

2) 풍속에 따른 클러터 특성

Table 7. Wind direction and speed in case of different wind speed

2001.1.26			2000.10.18		
시간	풍향	풍속(m/s)	시간	풍향	풍속(m/s)
01h	NE	8.6	08h	NE	4.1
02h	NE	7.5	09h	ENE	5.9
03h	ENE	9.5	10h	ENE	5.2
04h	ENE	9.8	11h	ENE	5.6

표 7에서는 풍향이 같고 풍속 차가 많이 나타나고 있는 2001년 1월 26일과 2000년 10월 18일의 매시 풍속자료를 나타내었다. 2001년 1월 26일 03시와 2000년 10월 18일 10시의 풍속은 9.5m/s와 5.2m/s로 풍속차이가 4.3m/s의 차이를 보이고 있다. 이때의 해상 클러터 현상을 그림 15와 같이 나타내었다.



(a) Sea clutter image(2001.1.26 03h) (b) Sea clutter image(2000.10.18 10h)

Fig. 16. Radar image

그림 16(a)에서는 2001년 1월 26일 풍향이 동북동풍이고 03시의 풍속이 9.5m/s의 강한 바람이 불때 폭넓은 해상 클러터현상을 나타내고 있다. 그림 16(b)는 2000년 10월 18일 10시 동북동풍이 5.2m/s로 불때 해상 클러터현상을 나타내고 있다. 두 경우를 비교하였을 해상 클러터현상이 약 3배 이상이 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 해상 클러터는 풍향과 풍속의 세기에 의해 발생범위와 면적이 아주 다르게 나타나고 있는데, 풍속의 세기에 약 3배정도 나타나고 있다

V. 결론

레이더 사이트에서 고도각이 0도이면 레이더 빔이 정상적으로 240km를 진행하면 3~4km높이의 강수를 탐지하게된다. 그러나 기상외 이상 조건에 의해 덕트가 발생하여 더 먼 곳의 물체를 탐지하거나 빔이 과대굴절되어 빔 방향이 아래쪽으로 휘어 해수면을 탐지하게 되면 이상에코를 나타내게 되어 강우 관측에 어려움을 준다. 본 논문에서는 우리나라 기상레이더에서 관측되는 이상에코의 발생 원인을 규명하고 바람에 따른 해면 클러터의 발생과 형태에 대해 연구하였다.

2000년부터 3년간의 기상 자료로부터 맑은 날을 중심으로 레이더 합성 영상과 위성 합성 영상을 조사하여 한반도의 서해상과 남해 상에 발생된 이상에코 현상의 발생 빈도를 조사하였다. 그 결과 주로 봄철에 집중적으로 발생함을 알 수 있었고, 이것으로부터 봄철의 기상 데이터를 중심으로 이상에코에 대한 특성을 해석하였다. 고산기상대와 백령도기상대에서 관측된 고층 대기의 기상 자료를 분석하여 대기 상태에 따른 굴절률 지수와 고도에 따른 온도의 변화 및 습도의 변화 정도를 그래프로 표현하여 이들의 상관 관계로부터 덕트가 발생하게되는 필요충분 조건을 제시하였다. 여러 사례로부터 이 필요충분 조건은 굴절률 지수가 $-150/\text{Km}$ 이상이 되어야하고, 기온의 역전층이 생기면서 습도의 급격한 감소 현상이 함께 수반되어야 함을 규명하였다. 한편 해면 클러터의 특성은 풍향에 따라 그 세기와 모양이 달라지고, 풍속이 강해짐에 따라 클러터의 범위가 넓어짐을 알 수 있었다.

기상레이더로 강수를 탐지하는데 있어 레이더 빔의 과대굴절로 인하여 지형에코가 탐지되었을 경우, 레이더 변수설정에서 움직이지 않는 지형에코는 알고리즘에 의해 제거되지만 바다에서 반사되어 탐지되는 에코는 이동하는 성분이 있기 때문에 제거되지 않고 에코로 표시된다. 따라서 레이더 영상에서 해

상의 해수면으로부터 반사되어 나타나는 에코와 덕트에 의한 에코는 제거되지 않으므로 고층 기상 관측자료를 정확히 분석하여 레이더 영상에서 나타나는 에코가 강수에코인지 이상에코인지를 정확히 판단하는 것이 바람직하다.



참고문헌

- A. Farina, 1992, Antenna-Based Signal Processing Technique for Radar Systems, Artech House, Boston London, Chapter 1, Chapter 3, pp.1~12, pp.59~94.
- 기상청, 2000~2002, 고층기상월보.
- G. V. Trunk, 1972, "Radar Properties of Non-Rayleigh Sea Clutter" , IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems, Vol.AES-8, No.2.
- J. L. Eaves, E. K. Reedy, 1987, Principles of Modern Radar, Van Nostrand Reinhold Company Inc, Chapter 3, 11, pp.51~71, pp.343~367.
- 장재성, 1993, S-Band 레이더에서의 기상변화에 따른 전파전파 특성에 관한 연구, pp.56~74.
- 고흥진, 1993, S-밴드 레이더에서의 덕트와 클러터현상에 관한 연구.
- 이상설, 1991, 안테나 및 전자파 전파, 형설출판사.
- 이상설, 1997, 레이더 공학.
- Merrill I. Skolnik, 1970, Introduction to Radar Systems.
- O. Sasaki and T. Akiyama, 1982, Studies on Radio Duct Occurrence and Properties, IEEE Trans. Antennas Propagations, Vol., AP-30, No.5.
- Peebles. Peyton Z., 1988, Radar Principles.
- Rinehart. Ronald E., 1997, Radar for Meteorologists.
- Saunders. Peter M, F. Claude Ronne, 1962, A Comparison between the Height of Cumulus Clouds and the Height of Radar Echoes Received from Them, *Journal of Applied Meteorology*, 1, pp.296~302.

감사의 글

늦게 다시 시작한 학문의 길을 지나오면서, 끝이 없는 것이 학문의 길이라는 말을 다시 한번 깨달으며, 부족하지만 이 작은 결실을 내놓습니다.

이 논문이 완성되기까지 저에게 아낌없는 충고와 가르침을 주신 김홍수 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사 드립니다.

아울러 바쁜 일정에도 불구하고 논문심사를 위해 많은 지도와 격려의 말씀을 해주신 이용학 교수님, 강진식 교수님 그리고 관심과 조언을 주셨던 문건 교수님 임재운 교수님, 양두영 교수님, 좌정우 교수님께도 감사드립니다.

그리고 항상 바쁜 가운데서도 격려와 도움을 주었던 안테나연구실 식구들에게도 고마움을 전합니다.

또한 학업을 마칠 수 있게 배려해주신 기상청 직원 여러분께 진심으로 감사드립니다.

끝으로 오늘이 있기까지 격려를 아끼지 않았던 사랑하는 아내 김정희와 그 동안 함께 많은 시간을 못했던 아들 정완, 딸 해민과 함께 이 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.