

대기 굴절률 변화에 따른 레이더 성능 변화에 관한 연구

Radar Performance Variation according to the Change of Atmospheric Refractive Index

박명훈 · 전우중 · 김현승 · 권세웅 · 문현욱 · 이기원

Myung-Hoon Park · Woo-Joong Jeon · Hyun-Seung Kim · Se-Woong Kwon · Hyun-Wook Moon · Ki-Won Lee

요 약

레이더 성능 변화에 원인이 되는 요소는 장비 노후와 같은 내부적인 원인과 지형 및 대기과 같은 외부적인 원인이 있다. 특히 대기는 변경 불가능한 자연적인 요소로 불가피한 성능 변화의 원인이다. 대기 상태에 따라 실시간으로 굴절률이 변하고, 이는 전파환경을 바꾸며 레이더 성능에 영향을 준다. 굴절률에 따라 대기 상태를 *super*, *sub*, *standard*, *normal*, *trap*으로 구분하며, 각 대기 상태별 레이더의 최대 탐지 거리 등 성능 변화가 다르게 나타난다. 따라서 대기에 따라 레이더 성능 변화를 예측하고 대응하는 것은 중요하다. 이를 위해 본 논문에서는 M&S 도구를 이용하여 굴절률에 따라 저고도 최대 탐지 거리 및 원거리 탐지 성능의 변화를 분석하였다. 그 결과, 굴절률이 커질수록 최대 탐지 거리가 줄어들고 굴절률이 작아질수록 최대탐지거리가 늘어나는 것을 보였으며, 이상 대기에 따른 원거리 레이더 탐지 성능 변화가 나타난 것을 볼 수 있었다.

Abstract

Factors that contribute to varying radar performance include internal causes such as equipment obsolescence, and external causes such as terrain and atmosphere. In particular, the atmosphere, which is a natural element, causes inevitable performance changes. The refractive index changes with atmospheric conditions in real time and affects the propagation environment, which affects the radar performance. Depending on the refractive index, atmospheric conditions are divided into *super*, *sub*, *standard*, *normal*, and *trap*, and the radar performance changes, such as the maximum detection range, occur differently during each atmospheric state. Therefore, it is important to predict and respond to changes in radar performance depending on the atmospheric conditions. In this study, the changes in the maximum detection range at low altitudes and detection performance at a long distance are analyzed using the M&S tool with respect to the refractive index. As a result, the maximum detection range decreases for a larger refractive index and vice versa, while the detection performance at a long distance changes because of abnormal atmospheric conditions.

Key words: Refractive Index, Radar Modeling and Simulation, Propagation Environment, Atmosphere Conditions, APM

I. 서 론

레이더 운용 중 성능 변화는 내부와 외부 원인으로 구분할 수 있다. 내부 원인으로는 장비 노후, 설계 오류 등

LIG넥스원(주) (LIG NEXI Co., Ltd.)

· Manuscript received May 28, 2021 ; Revised June 23, 2021 ; Accepted July 21, 2021 (ID No. 20210528-053)

· Corresponding Author: Myung-Hoon Park (e-mail: myunghoon.park2@lignex1.com)

이 있으며, 외부 원인으로는 지형 및 대기 환경 등이 존재한다. 내부 원인의 경우, 시스템 점검 및 정비를 통해 성능 변화를 방지할 수 있지만, 외부 원인은 운용 위치 및 시간에 따라 다르기 때문에 성능 변화 방지가 어렵다. 지형의 경우, 레이더 설치 후 지형 분석을 통한 성능 변화를 줄일 수 있는 반면, 대기 환경은 실시간 바뀌고 예측하기 어렵기 때문에 대응하기 힘들다. 하지만 대기 환경의 영향성은 레이더 운용에 있어 매우 큰 부분을 차지하기 때문에 성능 변화 방지를 위한 분석이 필요하다. 기존 연구에 따르면 시공간에 따른 대기 환경을 반영하기 위해 라디오존데(Radiosonde)와 같은 기구를 통해 대기 상태를 측정하여 굴절률을 계산하고, 굴절 변화율을 모델링한 다양한 지수 함수들이 연구되었다^{[1]~[3]}.

대기 환경은 전파 굴절률에 따라 정상대기인 standard, normal, sub, super와 이상대기인 trap(duct)으로 구분할 수 있으며, 서로 다른 전파 환경을 구성한다. 같은 대기 환경에서도 전파 굴절률에 따라 레이더 성능에 서로 다른 영향을 준다. 굴절률의 변화로 최대 탐지 거리, 원거리 탐지 등 다양한 레이더 성능이 저하 또는 향상되는 변화가 나타난다. 함정에 설치된 레이더 및 저고도 표적을 탐지하는 레이더는 지구 곡률에 의해 상대적으로 전파 가시거리가 짧아 탐지 거리는 매우 중요한 성능이다. 특히 sea-skimmer와 같은 저고도 표적의 경우, 대기 환경에 의한 최대 탐지 거리 변화의 영향이 크며, 고고도의 장거리에서 또한 대기 환경에 의해 전파 환경 구성이 달라져 탐지 성능에 변화가 생긴다.

본 논문에서는 이러한 대기 환경에 의한 레이더 성능 변화를 분석하기 위해 M&S(Modeling and Simulation) 방법을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 기존 레이더 탐지 성능 분석 M&S 도구와 대기환경을 반영할 수 있는 APM(Advanced Propagation Model)을 통합하여 사용하였다^[4]. 논문 2장에서는 구성된 모델에 관하여 기술하였고, 3장에서는 전파 굴절률에 따른 저고도 최대 탐지 변화 및 고고도 탐지 성능 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 기술하였다.

II. 본 론

대기의 기상 상태에 따라 굴절 현상 등으로 레이더의

성능 변화가 나타나 정확한 성능을 예측하고 평가하기 위해서는 기상 상태 등의 환경적 요인의 영향을 반영한 M&S 분석이 필요하다. 대기 굴절률은 레이더 성능을 변화시키는 대표적으로 외부 원인 중 하나이다. 전파의 굴절을 나타내는 척도로 RRI(radio refractive index)를 이용한다. RRI는 전파가 매질을 통과하면서 굴절되는 특징을 나타내고, 높이에 따라 서로 다른 값을 가지며, 식 (1)과 같이 온도, 압력, 수증기압을 통해 구할 수 있다^[5]. RRI를 측정하는 방법으로는 대표적으로 라디오존데를 이용한 측정 방식이 있다. 이 장비를 이용하여 측정한 기상 데이터를 통해 굴절률을 계산하고, 기울기에 따라 표준굴절(standard refraction), 정상굴절(normal refraction), 아굴절(sub refraction), 초굴절(super refraction), 덕팅(ducting)으로 구분한다. 이때 RRI는 덕팅 등을 중심으로 대기 상태를 확인하는데 불편함이 있어 편의성을 위해 지구 곡률을 반영한 MRI(modified refractive index)가 사용되며, 식 (2)와 같이 관계식을 가진다.

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + (3.75 \times 10^5) \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

$$M(h) = N(h) + 0.157 \times h \quad (2)$$

P : 압력 (hPa) e : 수증기압 (hPa)

T : 온도 (K) h : 고도 (m)

MRI는 그림 1과 같이 높이에 대한 기울기가 0보다 작으면 덕팅, 0보다 크면 아굴절, 초굴절 등으로 구분할 수 있으며, 그 기준은 표 1과 같다^[6].

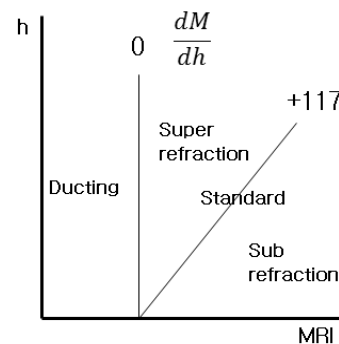


그림 1. dM/dh 의 굴절률 조건 분류

Fig. 1. dM/dh plot of refractive condition classes.

표 1. 굴절 기울기 및 상태 분류

Table 1. Refractive gradients and condition.

Condition	N-Gradient [N/km]	M-Gradient [M/km]
Ducting	< -157	< 0
Superrefraction	$-157 \sim -79$	$0 \sim 79$
Normal	$-79 \sim 0$	$79 \sim 157$
Standard	-39	118
Subrefraction	> 0	> 157

대기권에서 전파되는 전자기파는 대기층의 굴절을 변화에 의해 굴절이 일어나며, 매질 내에 전파되는 평면파의 필드는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)로부터 계산되는 굴절률(n)을 통해 대기권에서 전자기파가 전파될 때 굴절효과의 영향성을 반영할 수 있으며, 이때 r 는 공간변수, t 는 시간변수이며, k_0 는 자유공간에서의 파수(wave number)를 나타내고, ω 는 $2\pi \times \text{frequency}$ 이다.

$$E(\vec{r}, t) = E_0 e^{i(n(\vec{r})\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (3)$$

각 대기 상태에 따라 전파 영향성을 보면 표준대기(standard)일 때 일직선으로 전파되지 않고, 아래쪽으로 굽어 전파된다. 표준대기를 기준으로 아굴절 시 기울기가 증가하여 방사된 전파는 정상굴절보다 위로 굽어져 지표면으로부터 멀어지게 된다. 전파가 위로 휘어져 형성되면서 레이다에 수신되는 클러터의 크기는 줄어드는 반면, 최대 탐지거리가 감소하는 문제점이 발생한다. 반대로 초굴절의 경우, 기울기가 감소하여 전파가 정상굴절보다 아래로 굽어져 전파된다. 초굴절은 지구 곡률과 동일해지는 임계기울기까지를 의미하며, 임계기울기 시 전파는 지구 표면과 평행하게 이동한다. 만일 기울기가 임계기울기보다 감소할 경우 덕팅이 발생한다. 이 경우, 전자기파는 지구 곡률보다 줄어들어 한정된 지역에 갇혀 이동하게 된다. 또한 대기 상태에 따른 레이다 성능 변화는 공통적으로 측정 고도 오차가 발생한다^[7]. 이러한 성능 변화를 예측하고 방지하기 위해서는 실시간 대기 분석에 따른 레이다 운용의 변화가 필요하다.

본 논문에서는 APM을 사용하여 대기 영향을 반영한 운용 환경에 따른 레이다 성능 변화를 분석하였다. APM은 FE(flat earth), RO(ray optics), XO(extended optics), PE

(parabolic equation)을 종속 모델로 구성된 혼합 모델이다. 각 모델들은 특성에 맞게 영역을 구분하여 사용되며, 최종적으로 지형 및 대기를 반영한 PF(propagation factor)를 계산한다. 본 논문에서는 특히 복잡한 지형 및 대기의 영향을 가장 잘 반영할 수 있는 PE 모델을 구성하여 적용하였다. PE 모델은 Helmholtz 파동 방정식을 푸는 모델로 저고도 영역의 지면 및 덕팅이 있는 층을 포함하여 분석한다. APM은 각 하위 모델을 통해 propagation factor를 계산하는데 PE 모델의 경우, 식 (4), 식 (5)와 같이 구성되어 있다^{[8]~[10]}.

$$u(x + \Delta x, z) = e^{jk_0 \Delta x 10^{-6} M(z)} \times F^{-1} \left\{ e^{i \Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} F(u(x, z)) \right\} \quad (4)$$

$$20 \log PF = 10 \log \left[(u_r^2 + u_i^2) x \right] \quad (5)$$

$x, \Delta x$: 거리 및 거리 증가폭

z : 높이

$M(z)$: 높이에 따른 MRI

F, F^{-1} : Forward & inverse Fourier transform

p : $k_0 \sin \theta$ 와 같으며, θ 는 전파각을 뜻함.

계산된 propagation factor 및 안테나 패턴을 고려한 전파 손실을 식 (6)을 통해 계산할 수 있다. 최종적으로 레이다 운용 환경이 반영된 전파 손실은 식 (7)에 사용되어 최대 탐지 거리(R_{\max})를 계산할 수 있게 된다. 이때 신호대잡음비(SNR)는 탐지확률(P_d) 및 오탐지율(P_{fa})의 레이다 요구 성능을 기준으로 결정된 값이다^{[4],[6]}.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 20 \log PF \quad (6)$$

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \tau_p \sigma_t N_p}{(4\pi)^3 (SNR) k T F_n L_p L_{sys}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

P_t : 송신전력(W)

N_p : 펄스 수

G_t : 송신이득(W/W)

σ_t : 표적 RCS(m²)

G_r : 수신이득(W/W)

τ_p : 펄스폭(sec)

λ : 파장(m)

L_{sys} : 시스템손실(W/W)

L_p : 대기손실(W/W)

T : 시스템 잡음 온도(K)

F_n : 잡음지수(W/W)

κ : Boltzman's constant [W/(Hz K)]

위와 같은 모델로 구성된 M&S 도구는 그림 2와 같은 순서로 대기 기상 상태에 따른 레이다 성능 변화를 분석한다. 라디오존테를 이용하여 대기 상태를 측정하고, 그 값들을 이용하여 전파 굴절률을 산출한다. 이후 APM을 통해 전파 환경을 구성하여 전파 손실을 계산한다. 최종적으로 계산된 손실 값은 레이다 방정식을 통해 레이다 성능 변화를 정량적으로 도출하는데 사용된다.

통합된 M&S 도구의 대기 환경 영향성을 검증하기 위해 식 (8)을 이용하여 굴절률에 따른 탐지 확률 변화를 보았으며, 그 결과는 그림 3과 같다^{[11]~[13]}. 표준대기를 기준으로 굴절률이 작아질수록 거리별 탐지 확률이 커지고, 굴절률이 커질수록 탐지 확률이 작아지는 것을 보였다.

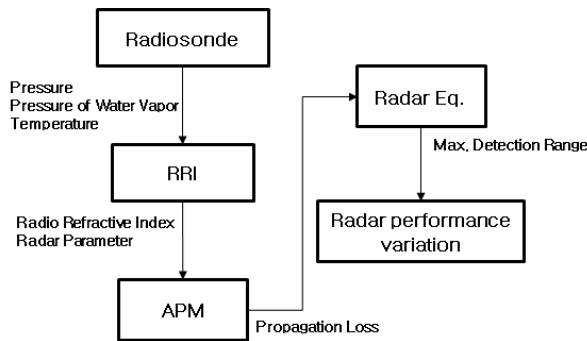


그림 2. 분석 흐름도

Fig. 2. Flow diagram of analysis.

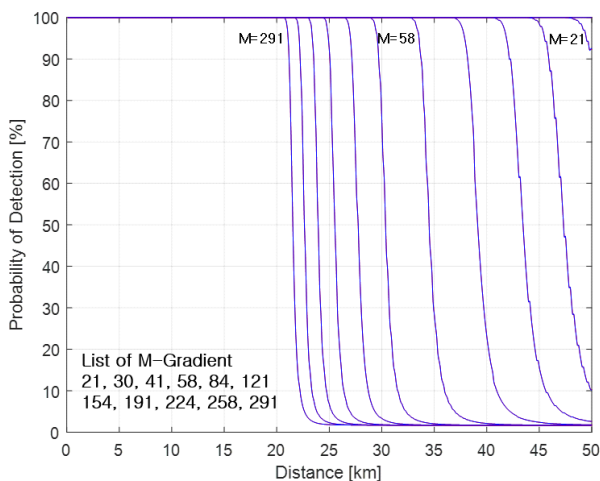


그림 3. 굴절률에 따른 탐지확률 결과

Fig. 3. Result of detection probability according to refractive index.

$$P_D = \frac{1}{1 + e^{-B}}, \quad B = \frac{10^Z - A}{1.7 + 0.12A} \quad (8)$$

$$A = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fa}}\right), \quad Z = \frac{SNR + 5\log_{10}N}{6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N+0.44}}} \quad (9)$$

P_{fa} : Probability of false alarm

N : Non-coherent integration number

III. 결 과

본 논문에서는 대기 상태에 따른 레이다 성능 변화를 보기 위해 약 600 ft에 해당하는 남한 전방 임의의 산 위치에 레이다를 설치하여 특정 날짜의 대기 상태를 반영한 성능 변화를 보았다. 대기 정보는 레이다 운용 장소와 가장 가까운 위치의 백령도 2020년 6월 4일 기상청 데이터를 사용하였고, 레이다 제원은 실제 운용 중인 레이다 성능을 반영하였다. 해당 대기에 따른 굴절률 변화는 그림 4와 같으며, 하층, 중간층 및 고층에 다수의 이상 대기가 발생하였고, 특히 분석 고도인 7,000 ft에서 아굴절이 형성된 것을 볼 수 있다.

M&S 도구를 통해 전방위 탐지 분포를 분석할 때에는 시간 축에서의 빔 송신 타이밍에 대한 효과를 제외하고 계산한다. 먼저 각 빔마다 정해진 송신 고각에 레이다 운

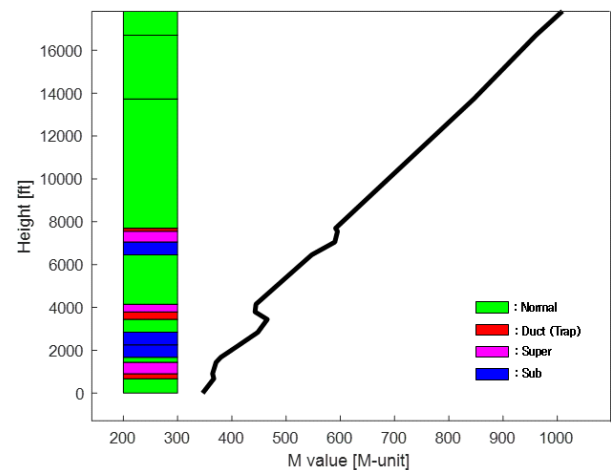
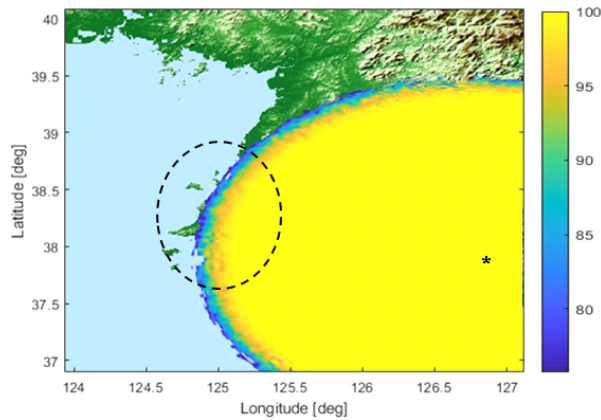


그림 4. 고도별 굴절률 결과 (20.06.04)

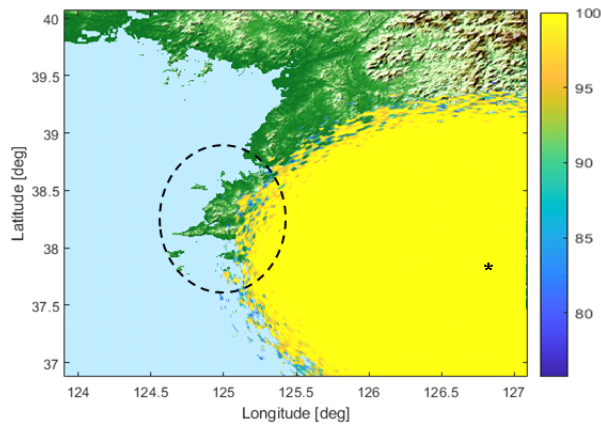
Fig. 4. Result of refractive index as altitude (20.06.04).

용 환경(지형, 대기)을 반영한 전파위 전파 손실을 계산하고, 이를 이용해 신호대잡음비를 구한다. 이후 분석하고자 하는 고도의 전파위 위치별 가장 큰 신호대잡음비를 통해 탐지 확률을 계산한다.

그 결과, 표준 대기 상태에서 전파된 결과(그림 5(a))와 이상 대기를 반영하여 전파된 결과(그림 5(b))에서 차이를 보였다. 형성된 이상 대기층(특히 해당 고도에서의 아굴절) 때문에 전파가 표준굴절에 비해 전반적으로 불안정해지고, 특정 지역까지 도달하지 못하는 것을 알 수 있



(a) 표준 대기 상태
(a) Standard atmosphere condition



(b) 이상 대기 상태
(b) Abnormal atmosphere condition

그림 5. 대기 상태에 따른 필드 분포 결과
Fig. 5. Result of field distribution according to atmosphere condition.

다. 탐지 확률 80 %를 기준으로 탐지 거리 차이를 보면 약 17.6459 km 짧아진 것을 보였다. 만일 항공기 표적이 해당 지역에 있었다면 포착하지 못하는 경우가 발생한다. 레이더 운용 시 대기 상태는 실시간으로 바뀌고 불가피하며 임의의 레이더 성능 변화를 일으키며, 예측하지 못한 표적의 불포착 원인이 된다.

이러한 레이더 성능 변화는 sea-skimmer와 같은 저고도 표적 탐지에서는 더욱 취약하다. 함정 등과 같이 낮은 고도에서 운용하는 레이더는 지구 곡률에 의해 상대적으로 낮은 고도의 표적 탐지 거리가 짧다. 때문에 저고도 고속의 표적을 방어하는 함정과 같이 빠른 대응 시간을 요구하는 체계에서는 대기 상태에 따른 성능 변화를 예측하고 체계 운용을 변경하여 운용 성능 변화를 방지하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 저고도에서 대기 굴절률에 따른 최대 탐지 변화를 표 2와 같은 시나리오로 추가 분석하였다.

그 결과, 그림 6과 같이 표준 굴절률 대비 작아질수록 범이 하방으로 굴절되어 최대 탐지 거리가 멀어지는 것을 볼 수 있으며, 반대로 커질수록 범이 위로 들려 최대 탐지 거리가 감소한 것을 보였다. 식 (10)을 통한 물리적인 가시거리를 계산해 보면 약 36.8 km이며, 이 거리보다 짧은 거리를 가지는 굴절률의 대기가 형성될 경우, 최대 탐지 거리가 짧아지는 성능 변화를 예상할 수 있다. 이러한 성능 변화는 정상 굴절로 구분하는 표준 대기에서도 발생한다. 표준 굴절률을 기준으로 아굴절률에 가까워질

표 2. 분석 시나리오 요약
Table 2. Summary of analysis scenario.

Item	Value
Analysis altitude [m]	20
Radar altitude [m]	20
Radar frequency	S-band
M-Gradient [M-unit]	21, 30, 41, 58, 84, 121, 154, 191, 224, 258, 291
Transmit angle [°] (elevation)	0
P_d [%]	80
P_{fa}	10^{-6}

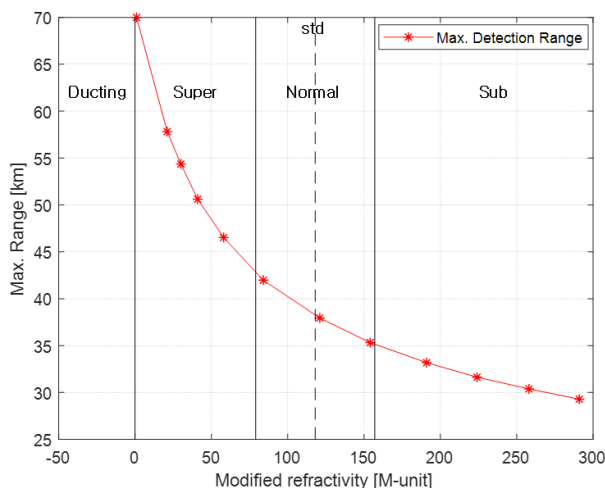


그림 6. 굴절률에 따른 최대 탐지 거리 결과
Fig. 6. Result of maximum detection range according to refractive index.

수록 정상굴절률 내에서 최대 탐지 거리가 최대 약 8.15 % 짧아질 수 있다. 또한 클러터 측면에서 보면 굴절률이 작을 시 클러터 신호가 강해지고, 굴절률이 클 경우, 클러터 신호가 작아질 것이다. 굴절률은 계절 특성에 따라 경향성을 가지기 때문에 굴절률 예측을 통해 굴절률이 작은 기간에는 클러터에 강한 CFAR(constant false alarm rate)을 사용하여 허위를 줄이고, 반대로 굴절률이 큰 기간에는 다른 장점을 가진 CFAR를 선택적으로 사용할 수 있게 된다.

$$d = d_r + d_t = \sqrt{2kR}(\sqrt{h_r} + \sqrt{h_t}) \quad (10)$$

d_r : 레이더에서 전파지평선까지의 거리(km)

d_t : 표적에서 전파지평선까지의 거리(km)

h_r : 레이더 고도(km), h_t : 표적 고도(km)

k : 유효 지구반경계수(일반 기상환경 4/3 적용)

R : 지구 반경(WGS84 좌표계의 장반경: 6,378.137 km)

본 논문에서는 1년 중 표준 대기(정상굴절률)에서 탐지 성능 변화가 발생 가능한 정도를 보기 위해 10곳의 라디오존데 중 한 곳을 선택하여 데이터를 분석하였다. 장소는 측정되는 고도가 상대적으로 많은 포항으로 선정하였고, 일시는 가장 최근인 2020년도 데이터를 사용하였다. 분석 고도의 경우, 일반적인 항공기 운용 고도를 고려하여 30,000 ft까지의 고도를 분석하였다. 그 결과, 그림 7과

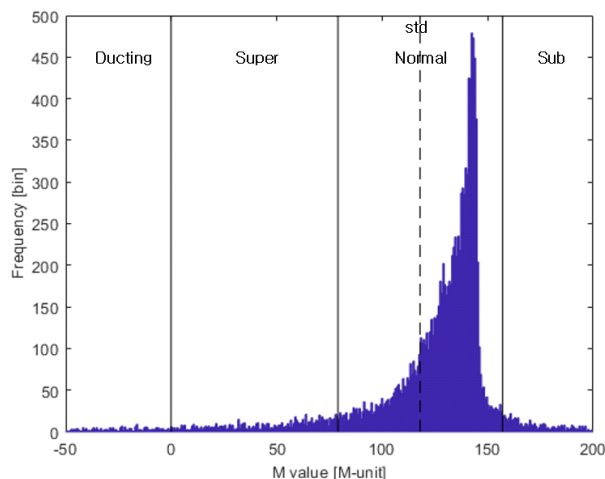


그림 7. 굴절률 분포 (1년)
Fig. 7. Distribution of refractive index (1 year).

같은 분포를 가지며, 평균 굴절률 크기는 119.1146, 상대적으로 많은 레이더 성능 변화를 주는 정상굴절률을 제외한 비율은 15.581 %이다. 실시간 변하는 굴절률은 예측하지 못한 레이더 성능 변화가 발생할 위험성이 커 탐지 성능의 안정화를 보장하기 어렵다. 또한 정상굴절률 내에서도 평균 굴절률이 130.1976으로 많은 날짜 대기 상태가 아굴절률에 가깝게 형성되어 저고도의 경우, 최대 탐지 거리가 짧아지는 성능변화가 자주 발생한다.

이러한 레이더 운용 환경을 반영한 성능 분석은 표적의 불포착 원인 파악, 레이더 운용시험 시 평가 기준 근거 자료 그리고 초기 설계 시 마진 결정에 활용할 수 있다.

IV. 결 론

레이더 운용 시 대기 상태에 따라 예측하지 못한 성능 변화가 발생하며, 이는 실시간 바뀌기 때문에 다양한 형태로 나타난다. 대기 상태는 라디오존데를 이용하여 기압, 기온, 이슬점 온도를 측정하여 굴절률을 계산할 수 있으며, 굴절률에 따라 표준굴절, 정상굴절, 아굴절, 초굴절, 덕트로 나눌 수 있다. 표준 및 정상 굴절률일 경우, 대기 상태를 표준 대기로 구분하고, 그 외의 굴절률을 가지면 이상 대기로 구분한다. 굴절률에 따라 서로 다른 레이더 성능 변화가 나타나며, 이러한 변화는 레이더 운용상 큰 부분을 차지하기 때문에 이를 예측하고 분석하는 작업이

필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 M&S 및 APM을 이용하여 대기 환경에 따른 레이더 성능 변화를 예측 및 분석하였다.

그 결과, 표준 대기를 기준으로 이상 대기가 발생했을 경우, 원거리 탐지 확률이 80 %를 기준으로 탐지 거리가 약 17.6459 km 짧아진 것을 보였다. 또한 저고도 최대 탐지 거리의 경우, 굴절률이 커질수록 거리가 짧아지는 것을 보였으며, 정상굴절 내에서도 아굴절에 가까울수록 최대 탐지 거리가 약 8.15%까지 짧아지는 것을 보였다. 또한 이러한 레이더 성능 변화를 발생시키는 굴절률 변화를 과거 1년 데이터를 분석한 결과, 정상굴절률을 제외한 나머지 굴절률이 차지하는 비율은 약 15.581%이며, 정상굴절을 내에서 평균 굴절률은 약 130.1976으로 아굴절에 가깝게 형성된 것을 보였다. 이 결과를 통해 1년 동안의 굴절률에 따른 빔의 진행 방향에 따라 클러터 영향 등 레이더 성능 변화가 많이 발생할 수 있는 것을 뜻하며, 특히 아굴절의 비율은 최대 탐지 거리가 짧아질 위험성이 많다는 것을 보여준다.

이러한 M&S도구를 통한 대기 상태에 따른 레이더 성능 변화 예측 및 분석은 레이더 설계 시 마진을 결정하는데 있어 참고자료로 활용되어 설계 위험성을 줄일 수 있다. 또한 레이더 운용 시 표적의 불포착 원인 파악 및 표적 탐지의 제한사항을 사전 도출하여 보다 합리적인 레이더 운용이 가능할 것이다.

References

- [1] B. R. Bean, G. D. Thayer, "On models of the atmospheric radio refractive index," *Proceedings of the IEEE*, vol. 47, no. 5, p. 740, May. 1959.
- [2] B. R. Bean, G. D. Thayer, *CRPL Exponential Reference Atmosphere*, Washington, DC, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1959.
- [3] T. S. Lee, S. H. Choi, J. H. Chun, S. C. Kang, and D. M. Park, "Mathematical modeling of wave propagation considering the atmospheric and its application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 2, pp. 188-197, Feb. 2016.
- [4] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and K. W. Lee, et al., "Development of modeling & simulation tool for long range radar considering operational environment in time domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 7, pp. 591-602, Jul. 2019.
- [5] P. J. W. Debye, *Polar Molecules*, New York, NY, Dover, 1957.
- [6] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [7] S. W. Kwon, J. H. Lee, Y. W. Kwon, K. W. Lee, H. S. Kim, and W. Sun, "Analysis of an altitude detection accuracy by a weather effect for long range and multi function radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 1, pp. 123-129, Jan. 2014.
- [8] A. E. Barrios, "A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 1, pp. 90-98, Jan. 1994.
- [9] G. D. Dockery, "Modeling electromagnetic wave propagation in troposphere using the parabolic equation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 10, pp. 1464-1470, Oct. 1988.
- [10] F. J. Ryan, "Analysis of electromagnetic propagation over variable terrain using the parabolic wave equation," *Naval Ocean Systems Center ADA248061*, Oct. 1991.
- [11] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principle of Modern Radar: Basic Principles*, Raleigh, NC, SciTech, 2010.
- [12] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2014.
- [13] J. V. DiFranco, W. L. Rubin, *Radar Detection*, Dedham, MA, Artech House, 1994.

박 명 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 지능형SW 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 체계설계, M&S, 안테나, 전파전파 등

권 세 웅 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8959-4452>



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 수석연구원
[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등

전 우 중 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3974-0631>



2010년 7월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
2016년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 지능형SW 연구소 선임연구원
[주 관심분야] M&S, 레이더, 제어 등

문 현 욱 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1298-2895>



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2014년 3월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파 전파, 무선채널 등

김 현 승 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4021-5914>



2014년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2016년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 지능형SW 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 항공제어, M&S, 추적 알고리즘 등

이 기 원 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2545-7579>



2000년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2002년 8월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2002년 7월~현재: LIG 넥스원 레이더연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 체계설계, 안테나, 신호처리 등