

국내 대기 환경을 반영한 레이다 성능 분석도구 개발 및 활용

Radar Performance Analysis Tool for Domestic Atmospheric Conditions: Development and Application

박명훈 · 김 정 · 전우중 · 권세웅 · 김상현 · 이기원

Myung-Hoon Park · Jeong Kim · Woo-Joong Jeon · Se-Woong Kwon · Sang-Hyun Kim · Ki-Won Lee

요 약

전파의 방향성은 대기를 구성하는 굴절률에 따라 달라진다. 굴절률은 시간과 장소에 따라 실시간 달라지며, 이에 따라 레이다 성능이 달라진다. 따라서 국내 대기 환경을 반영한 레이다 성능 변화에 대한 분석이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 굴절률 생성 모델, APM(advanced propagation model) 그리고 레이다 모델을 구성하여 국내 기상 환경을 반영한 레이다 M&S(modeling and simulation)분석도구를 개발하였다. M&S 분석도구를 이용하여 과거 5년간 국내 기상관측소 데이터(오산, 00UTC)에 따른 레이다 성능 변화를 분석하였다. 그 결과 220 NM을 기준으로 설계한 레이다의 경우, 목표 거리의 약 10 %에 해당되는 200 NM 이하 및 240 NM 이상의 성능 변화 비중이 각각 0.78 %, 1.45 %로 발생하였다. 또한 최대탐지거리의 변화가 여름철에 증가하다가 겨울철에 줄어드는 경향성을 보였으며, 여름 및 겨울에 낮은 표준편차를 가지는 것을 볼 수 있었다.

Abstract

The directionality and performance of radio waves are affected by the refractive index of the atmosphere, which varies in real time depending on the time and location. To reflect the domestic weather environment, we developed a radar modeling and simulation (M&S) analysis tool by constructing a refractive index generation model, APM, and radar model. We analyzed radar performance variations over the past five years using weather station data. For 220 nm-based radar designs, the performance variation ratios at 10 % above and below the design distance (i.e., 200 nm and 240 nm), were 0.78% and 1.45 %, respectively. The maximum detection range tended to increase in summer and then decrease in winter, with low standard deviations in both seasons.

Key words: Refractive Index, Radar M&S, Propagation Environment, Atmosphere Conditions, Radar Performance Variation

I. 서 론

레이다는 전파를 통해 신호를 송·수신하여 표적의 위치 정보를 알아내는 감시 체계의 핵심 장비 중 하나이다.

레이다에 적용되는 기술이 발전함에 따라 고(高)성능의 레이다가 요구되며 개발되고 있다^{[1],[2]}. 하지만 레이다 기술 발전과는 무관하게 레이다로부터 방사된 전파는 표적까지 도달하는 데 다양한 운용 환경에 노출된다. 특히 표

LIG넥스원(주)(LIG NEXI Co., Ltd.)

· Manuscript received June 13, 2023 ; Revised June 21, 2023 ; Accepted June 29, 2023. (ID No. 20230613-040)

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

적의 위치를 정확하게 탐지하기 위해선 전파의 방향성이 중요하다. 전파의 방향은 대기를 구성하는 굴절률에 의해 결정된다. 각 층별 서로 다른 굴절률로 구성된 대기에 의해 전파의 방향이 달라져 방사된 빔이 위아래로 휘거나 빔 깨짐 현상 등이 발생한다^[3]. 이러한 변화는 최종적으로 레이더 성능 변화를 일으켜 표적의 탐지를 손실하거나 측정 오차를 크게 만든다. 이를 방지하기 위해선 레이더 설계 시 최소한의 기본 마진 설계가 필요하다.

전파의 방향성을 결정하는 굴절률은 대기를 구성하는 두 층의 굴절도 차이를 통해 구할 수 있으며, 굴절도는 기압/기온/습도를 통해 계산할 수 있다. 이는 라디오존데(radiosonde)를 공중으로 띄워 측정할 수 있다. 굴절률은 실시간으로 변하기 때문에 정확한 미래의 값을 예측하기란 불가능하다. 단, 1년 주기를 보았을 때 계절에 따라 큰 주기의 반복적인 변화를 가지고 있다. 굴절률에 따라 대기상태를 보통대기와 이상대기로 구분할 수 있으며, 이상대기에는 아굴절(subrefraction), 초굴절(superrefraction), 덕팅(ducting)이 포함된다. 굴절 상태에 따라 서로 다른 레이더 성능 변화가 발생하며, 대표적으로 아굴절은 전파가 상대적으로 올라가 클러터 영향이 줄고 최대탐지거리가 감소한다. 반대로 초굴절은 빔이 아래로 휘어 클러터가 증가하고 최대탐지거리가 증가하는 변화를 가진다. 굴절률에 따른 레이더 성능 변화는 항상 발생하는 문제로 이에 대한 예측 및 분석을 통한 대비가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 국내 기상 환경을 반영한 레이더 성능 변화를 분석하기 위한 M&S(modeling and simulation) 분석도구를 개발하였다. M&S 도구는 크게 굴절률 생성 모델, APM(advanced propagation model) 그리고 레이더 모델로 구성되어 있다. 굴절률 생성 모델은 국내 기상관측소의 측정 데이터를 이용하여 굴절률을 계산하는 모델이다. APM은 지형과 굴절률, 레이더 제원을 통해 전파 손실을 계산하는 역할을 한다. 마지막으로 레이더 모델의 경우, 레이더의 운용을 모사하여 최종 대기상태를 반영한 레이더 성능을 도출한다. 위 모델들을 통합한 M&S 분석도구는 국내 대기상태를 반영한 레이더 주요 성능인 최대탐지거리와 정확도, 탐지율 등의 변화를 분석할 수 있다.

본 논문에서는 M&S 분석도구를 통해 과거 5년간 국내

기상환경을 반영한 레이더 성능 변화를 분석하였다. 이를 위해 오산에 위치한 기상관측소의 과거 5년('16~'20)의 측정 데이터를 활용하여 분석 척도인 최대탐지거리의 경향성을 분석하였다. M&S 분석도구의 각 모델 상세 내용은 II 장 본문, 분석 결과는 III 장 결과에 기술하였다.

II. 본 론

M&S 분석도구는 국내 대기 환경을 반영한 레이더 성능을 분석하는 도구이다. 특정 기동 시나리오에 따라 레이더 상세 분석이 가능하며, 또한 과거 N년간 누적된 대기 환경 데이터를 통해 레이더 성능 변화를 통계적으로 분석할 수 있다. 내부 모델로는 굴절률 생성, APM, 레이더 모델로 구성되며, APM 및 레이더 모델의 경우 MOP(measure of performance) 수준으로 모의되고 있다.

2-1 굴절률 생성 모델

국내 대기상태를 측정하는 기상관측소는 30 km 이상 상공까지 라디오존데를 통해 정기 관측시간(오전 9시, 오후 9시)에 데이터를 측정한다. 데이터는 일정 고도 간격으로 기온, 기압, 이슬점온도, 풍향/풍속 등이 측정되어 제공된다^[4]. 제공된 데이터를 활용하기 위해선 측정된 데이터 중 전파에 영향을 주는 기온, 기압, 이슬점온도를 제외한 나머지 데이터를 삭제하고, 3개의 데이터가 동시에 측정된 고도 층만을 분류하는 작업이 필요하다. 분류된 데이터를 통해 굴절도(N-unit)는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있으며, 빔의 진행 상태의 구별을 쉽게 표현하기 위해 식 (2)와 같이 수정된 굴절도(M-unit)와 같이 간편화할 수 있다^[5].

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

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

P : 압력(hPa) e : 수증기압(hPa)

T : 온도(K) h : 고도 (m)

N : 굴절도(N-unit) M : 수정된 굴절도(M-unit)

굴절률(N_{grad})의 경우, 식 (3)과 같이 두 층의 굴절도 차

이로 산출할 수 있다. 이때 고도의 경우, 식 (4)를 통해 구할 수 있다.

$$N_{grad} = (N_{i+1} - N_i) / (h_{i+1} - h_i) \times 10^3 \quad (3)$$

N_i, h_i : i 번째 층의 굴절도 및 고도

$$P_0 = P \left(1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15} \right)^{-5.257} \quad (4)$$

P_0 : 해면기압(hPa)

표 1과 같이 대기상태는 굴절률에 따라 구분되지만 같은 대기상태에서도 큰 차이의 굴절률을 가진다. 예시로 굴절률이 -70 N/km가 계산된 층은 보통대기(normal)로 구분되지만, 초굴절에 가까워 다른 보통대기의 굴절률 층보다 빔이 아래로 휘는 현상이 발생한다. 따라서 대기상태는 굴절률의 상태 및 전파 환경을 나타내는 지표로만 이용되고, 실제 전파 환경을 분석하는 데 있어서는 굴절률 값 자체를 사용한다. 전파 환경을 분석하는 데 필요한 굴절률의 특성을 모델링하는 연구가 다각도로 진행되었고, 다양한 모델이 존재한다^{[6],[7]}. 하지만 해당 모델들은 대기상태 측정이 불가능한 환경에서 활용하는 모델로 본 연구에서는 국내 기상관측소의 측정 데이터를 그대로 활용하였다.

대기상태를 분석하기 위해서는 해당 일시를 대표할 수 있는 굴절률을 선정해야 한다. 이를 위해 측정 데이터를 활용하여 전 층을 구성하는 굴절률을 분석하였고, 그 결과는 그림 1과 같다. 굴절률이 평균적으로 보통대기에 포함되지만 많은 층의 굴절률이 이상대기에 포함되는 것을 볼 수 있다. 해당 이상대기의 굴절률들은 실제 해당 굴절률값을 가질 수 있지만 두 층의 측정 고도 차이가 매우 작은 간격을 가지며, 계산된 경우에도 나타날 수 있다. 만

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

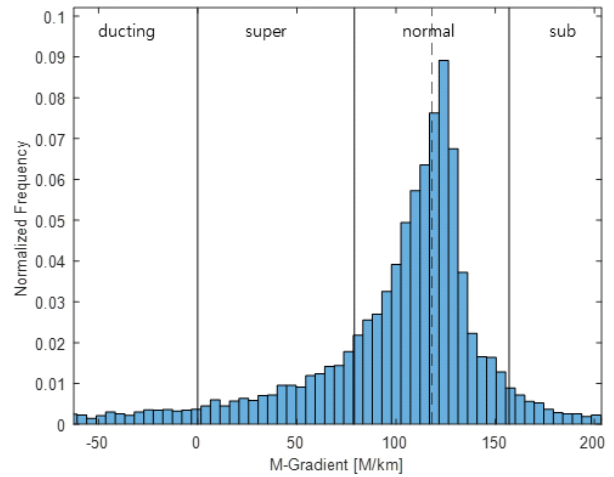


그림 1. 전 고도의 굴절률 분포 결과

Fig. 1. Result of distribution of refractive gradients in all altitude.

일 대기 중에 덕팅 층이 존재한다면 그림 2와 같이 전파는 일정 고도에 갇혀 전파되거나 빔 깨짐 현상이 발생한다. 이는 레이더 성능 저하에 있어서 매우 극단적인 상황에 해당하여 기본 마진 설계 시 이상대기 굴절률을 해당 일시의 대표 굴절률이라 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 매우 적은 고도차의 데이터는 제외하였고, 일반적인 비행고도를 포함하면서 레이더 최소한의 기본 마진 설계 목적에 따라 지상으로부터 1 km에 해당하는 굴절률을 계

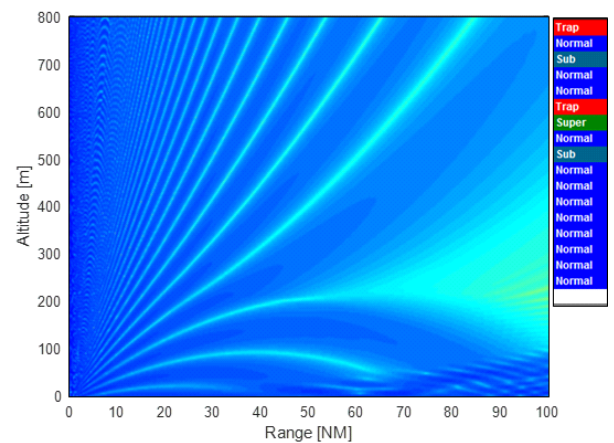


그림 2. 이상대기에 따른 전파전파 결과

Fig. 2. Result of wave propagation according to abnormal atmosphere.

산하여 대표 굴절률로 선정하였다.

2-2 APM(Advanced Propagation Model)

전파 환경 분석은 레이더 설계 및 성능 분석에 중요한 부분이며 이를 위해 많은 전파 모델 연구가 진행되어 왔다. 특히 정확성과 계산 속도의 절충점을 찾아 여러 모델의 장점들을 혼합한 혼합 모델이 연구되었으며, 그중 APM이 대표적인 모델이다. APM은 그림 3과 같이 FE(flat earth), RO(ray optics), XO(extended optics), PE(parabolic equation) 모델이 구역을 나눠 전파 환경을 계산한다. 각 모델들을 통해 계산되는 값은 PF(propagation factor)로 이 값을 통해 전파 손실을 계산할 수 있다^[8].

각 영역의 사용 방법을 보면 우선 2.5 km 내의 지형이 평탄하다고 가정할 때 5° 위의 영역에 대해서는 FE모델을 사용한다. FE 모델은 평탄한 기하학적 지구에 대해 전파 손실을 계산하나, RO 영역 사이의 일치를 위해 유효 지구 반경을 고려한다. 이에 따라 계산되는 직접파와 반사파에 의한 총 PF는 식 (5)와 같으며, Ω 은 직접파와 반사파의 총 위상 차이로 식 (6)과 같이 자유공간에서의 파수(wave number) k_0 와 Fresnel 반사 계수의 위상 φ 로 구할 수 있다^{[8][9]}.

$$F^2 = F_d^2 + F_r^2 + 2F_d F_r \cos \Omega \quad (5)$$

$$\Omega = (r_2 - r_1)k_0 + \varphi \quad (6)$$

F_d, F_r : 직접 및 반사파에 대한 PF

r_1, r_2 : 직접 및 반사파의 경로 길이

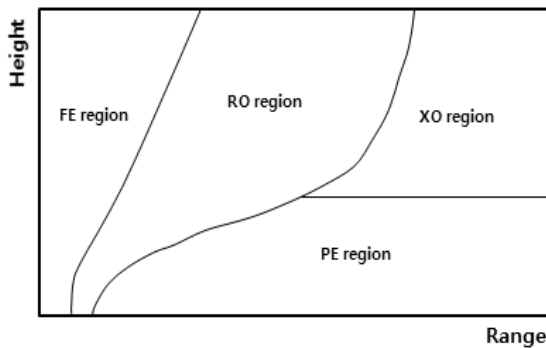


그림 3. APM 모델의 종속 모델 구성 및 영역

Fig. 3. Regions of APM hybrid submodels.

이때 직접파와 반사파에 의한 PF는 식 (7)과 같이 계산되며, 각각의 전파각은 식 (8)을 통해 구할 수 있으며, $f_{d,r}$ 은 직접 및 반사파의 전파각(α)에 따른 안테나 패턴을 나타낸다. 이때 x, z 의 경우 거리 및 높이를 나타내며, 유효 지구 반경을 고려한 고도 z_e 는 식 (9)와 같다.

$$F_d^2 = f^2(\alpha_d), \quad F_r^2 = f^2(\alpha_r)R^2 \quad (7)$$

α_d, α_r : 직접 및 반사파의 전파각

R : Fresnel 반사 계수 크기

$$\alpha_d = \tan^{-1} \left[\frac{(z_e - z_t)}{x} \right], \quad \alpha_r = \tan^{-1} \left[\frac{(z_e + z_t)}{x} \right] \quad (8)$$

$$z_e = z - \frac{x^2}{2ak_e} \quad (9)$$

a : 지구 반경

k_e : 지구 유효 반경 계수

RO 모델은 PE 모델의 최대 전파각부터 5° 아래의 영역에 대해서 사용되는 모델이다. 각 지점마다 직접파와 반사파에 대한 광선 추적(ray trace) 결과를 통해 상호 간섭을 구하여 식 (10) 및 식 (11)을 통해 전파 손실을 계산한다. 경로 길이 차이(Pl)의 경우, 식 (12)를 이용하여 각 광선 추적 단계에서 계산하여 수신점에서 각 광선의 총 경로에 대해 더해진다^[10]. 이때 α 는 송신점에서의 전파각을 나타내고, α_0 및 α_1 은 각각 광선 추적 단계에서의 초기 및 끝 각도이다.

$$F^2 = F_d^2 + F_r^2 + 2\sqrt{|F_d F_r|} \cos \Omega \quad (10)$$

$$\Omega = (Pl_r - Pl_d)k_0 + \varphi \quad (11)$$

Pl_d, Pl_r : 직접 및 반사파의 광학 경로 길이

$$Pl = \sum_i \left[\left(10^{-6} M_i - \frac{\alpha_0^2}{2} \right) (\alpha_1 - \alpha_0) + \frac{1}{3} (\alpha_1^3 - \alpha_0^3) \right] \times \left[\frac{10^{-6} (M_{i+1} - M_i)}{z_{i+1} - z_i} \right]^{-1} \quad (12)$$

M_i, z_i : i 번째 층의 수정된 굴절도 및 높이

광선 추적에 의해 결정되는 직접파와 간접파는 전파각(β), 광선 총 거리(X), 퍼짐 정도(S)를 통해 구할 수 있으며, 식 (13)과 같이 표현된다.

$$F_d^2 = \left| \frac{X}{\beta_d S_d} \right| f^2(\alpha_d), F_r^2 = \left| \frac{X}{\beta_r S_r} \right| [f(\alpha_r) R]^2 \quad (13)$$

저고도 영역의 지면 및 ducting이 있는 층을 포함하여 Helmholtz 파동 방정식을 푸는 PE 모델은 지면부터 RO 모델을 사용할 수 없는 고도까지 사용된다. 식 (14) 및 식 (15)를 통해 전파 환경을 계산하는 PE 모델은 FFT 크기를 최소화하고, 고도 분석 해상도를 최대로 만들어 계산 효율성을 높여 빠른 계산 속도를 가진다^{[8],[9]}.

$$u(x + \Delta x, z) = e^{jk_0 \Delta x 10^{-6} M(z)} \times F^{-1} \left\{ e^{i \Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} F(u(x, z)) \right\} \quad (14)$$

$$20 \log PF = 10 \log \left[(u_x^2 + u_z^2) x \right] \quad (15)$$

$x, \Delta x$: 거리 및 거리 증가폭

z : 높이

$M(z)$: 높이에 따른 굴절도

F, F^{-1} : Forward & Inverse Fourier Transform

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

2.3 레이더 모델

레이더 성능에는 최대탐지거리, 탐지율, 오차, 분해능 등이 있다. 본 논문에서는 다양한 레이더 성능 중 굴절률에 따른 변화의 형태가 직관적인 최대탐지거리를 분석 척도로 선정하였다. 최대탐지거리는 식 (16)을 통해 계산되며, 레이더 제원과 운용환경 손실에 의해 결정된다. 이때 대기 손실(L_p)의 경우, 해당 대기의 굴절률을 반영하여 APM에서 계산된 손실을 입력받아 사용하였다^{[3],[11]}.

$$R = \sqrt[4]{\left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T_p N_p \sigma_t}{(4\pi)^3 SNR k T L_p L_{sys}} \right)} \times G_{sp} \quad (16)$$

P_t : 송신전력(W) N_p : 펄스 수

$G_{t,r}$: 송·수신이득(W/W) σ_t : RCS(m²)

λ : 파장(m) L_{sys} : 시스템손실(W/W)

T_p : 펄스폭(sec) L_p : 대기 손실(W/W)

k : Boltzman's constant[W/(Hz K)]

T : 시스템 잡음 온도(K)

SNR : 탐지확률 00 %, 오탐지율 10^{-0} 에 해당하는 임계치의 신호대잡음비(W/W)

레이더 모델은 분석 목적에 따라 실제 신호를 생성하지 않고 전력수준의 모의, 모든 변수는 펄림이 없는 고정값을 사용하는 등 MOP 수준으로 모의하였다.

2.4 모델 통합

국내 대기 환경을 반영한 레이더 성능변화 M&S 분석 도구는 그림 4와 같은 순서로 동작한다. 분석하는 레이더의 위치와 가장 가까운 국내 기상관측소의 위치와 날짜, 시간을 통해 대기 측정 데이터를 입력하면 굴절도를 구하기 위한 포맷으로 데이터를 가공한다. 가공된 데이터는 굴절도 계산 모델을 통해 고도별 굴절도를 계산하여 각 층의 굴절률을 산출한다. 산출된 굴절률과 안테나 패턴(고각) 및 레이더 제원이 APM으로 입력되어 해당 날짜를 반영한 대기 손실을 계산하게 된다. 계산된 대기 손실이 레이더 방정식을 통해 최종적으로 탐지거리 등 레이더 성능을 산출할 수 있게 된다. 또한 그림 5와 같이 각 모델별 중간 결과로 고도별 대기 굴절률 그래프 및 누적 분포, 전파 필드 결과 등을 분석할 수 있다(결과 그래프는 팝업창을 통해 가시화 및 상세 분석 가능).

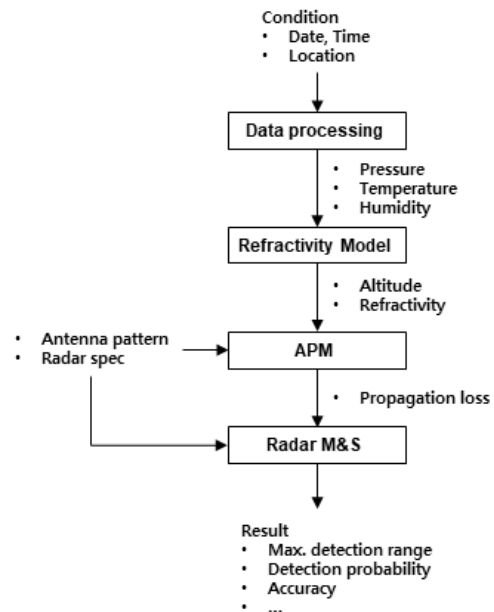


그림 4. M&S 분석도구 흐름도

Fig. 4. The flow diagram of M&S analysis tool.

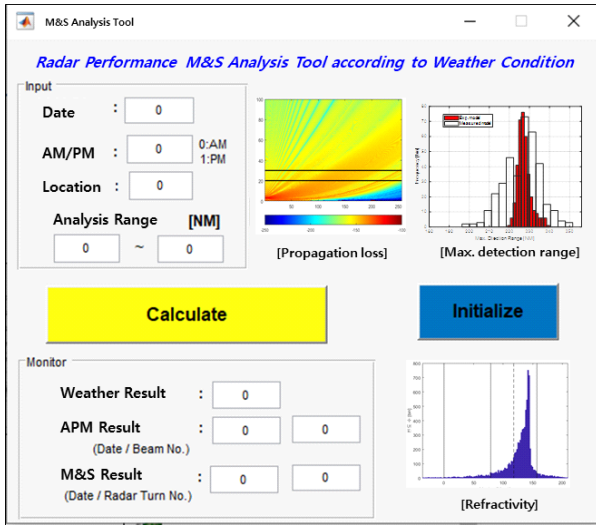


그림 5. M&S 분석도구 화면
Fig. 5. Scene of M&S analysis tool.

III. 결 과

본 논문에서는 M&S 분석도구를 통해 국내 과거 대기 환경의 변화와 그에 따른 레이더 성능 변화의 경향성을 분석하였다. 이를 위해 오산 기상관측소의 과거 5년(16~20) 오전(00 UTC) 고층 데이터를 사용하였다. 우선 연

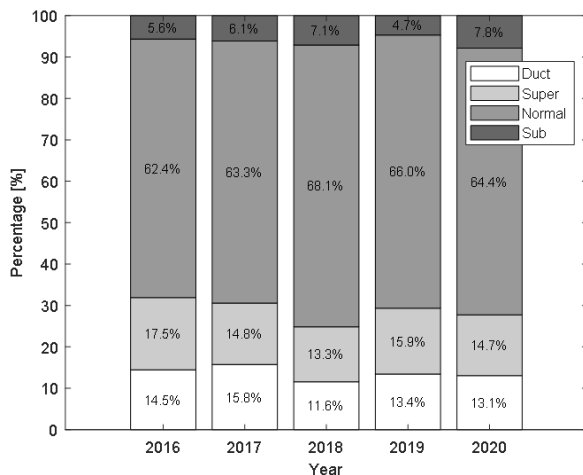


그림 6. 5년간 굴절률 분포 결과
Fig. 6. Result of percentage of each atmosphere condition during five years.

도별 각 층을 구성하는 굴절률의 빈도를 보면 그림 6과 같다. 공통적으로 보통 굴절률이 가장 많은 빈도(평균 약 64.8 %)를 차지하였고, 반대로 아굴절의 빈도(평균 약 6.2 %)가 가장 적었다. 특정 층에 빔이 갇히는 덕팅과 빔이 아래로 휘는 초굴절의 경우, 각각 5년간 평균 약 13.6 %와 15.2 %의 빈도수를 가졌다. 보통대기의 굴절률이 많은 비중을 차지하지만 보통대기의 범위 내에서도 아굴절 및 초굴절값에 가까운 굴절률은 전파의 경로가 많이 달라진다. 따라서 굴절률에 따른 레이더 성능 변화를 좀 더 상세 항목을 통한 분석이 필요하다.

나아가 일별 굴절률 변화의 경향성을 분석하기 위해 해당 일시의 대표 굴절률을 계산하였고, 그 결과는 그림 7과 같다. 1월 상대적으로 높은 굴절률을 시작으로 여름철로 갈수록 낮아지다가 다시 높아지는 1년 주기를 가지며, 이 주기는 매년 반복된다. 또한 이동평균을 통해 굴절률 변화의 평균 변화를 그려보면 연도가 지날수록 최소 굴절률 값이 점차 증가하는 경향성을 가졌다.

계절별 특성을 보기 위해 5년간 연도별 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월) 그리고 겨울(12~2월)로 구분하여 나열한 결과는 그림 8과 같다. 모든 연도가 동일하게 굴절률의 평균이 여름철에 가장 작고 겨울철에 큰 값을 가졌으며, 반대로 특정 연도(19)를 제외하고 표준편차

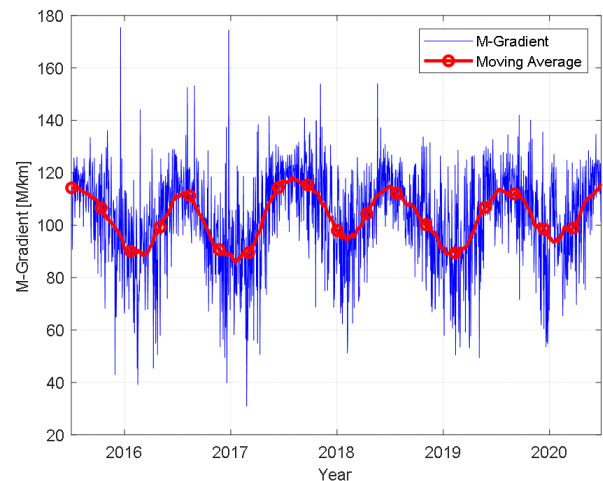


그림 7. 5년간 1 km의 굴절률 변화 결과
Fig. 7. Result of trend of refractive gradients at 1 km during five years.

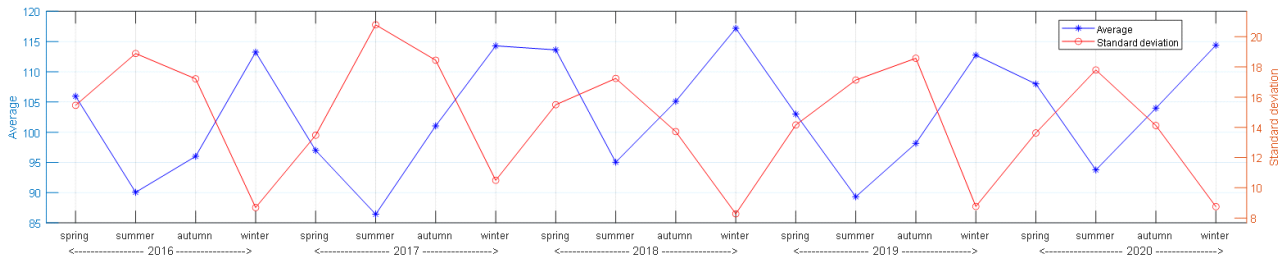


그림 8. 5년간 굴절률 평균 및 표준편차 결과

Fig. 8. Result of average and standard deviation of refractive gradients during five years.

의 크기가 여름철에 가장 크고 겨울철에 작은 값을 가졌다. 이는 대기 굴절률에 의해 레이다 운용 시 여름철에 최대탐지거리가 증가하고, 겨울철에는 감소하는 변화가 발생할 수 있다. 이를 분석도구를 통해 과거 5년 대기상태에 따른 최대탐지거리의 분포, 경향성, 계절별 특성 등을 확인하였다.

본 연구에서는 최대탐지거리 220 NM(1 NM은 1.852 km에 해당되는 값)을 기준으로 설계한 레이다를 모의하였으며, 5년간 최대탐지거리의 분포 결과는 평균 221.98 NM과 8.84 NM의 표준편차를 가졌고, 그 형태는 그림 9와 같다. 목표 거리의 약 10 % 이상에 해당되는 성능 변화의 비중을 보면 아굴절에 의해 전파가 위로 들려 200 NM 이하의 탐지거리를 가지는 경우가 약 0.78 %, 초굴절에 의해 전파가 아래로 휘어 240 NM 이상의 거리가 약

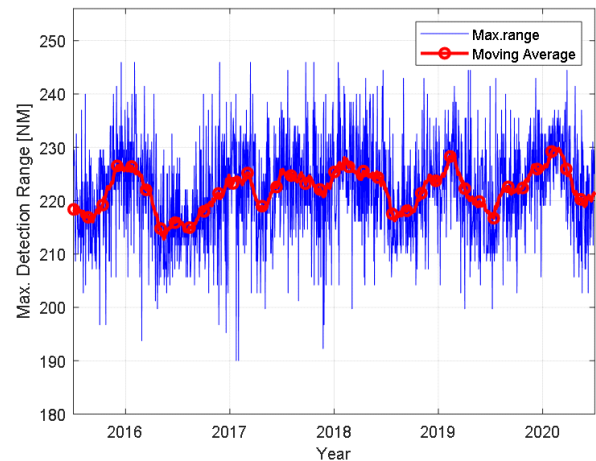


그림 10. 5년간 최대탐지거리의 변화 결과

Fig. 10. Result of trend of maximum detection range during five years.

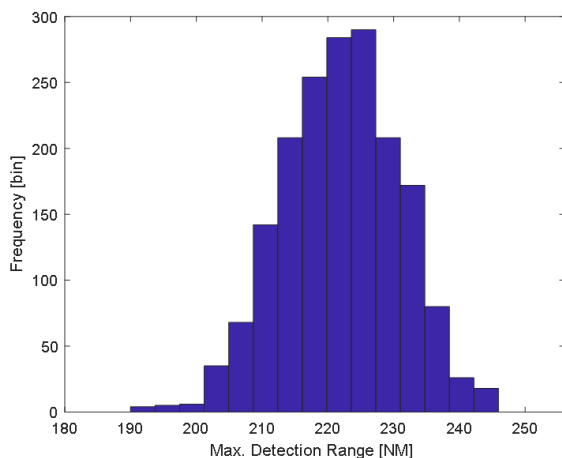


그림 9. 5년간 최대탐지거리 분포 결과

Fig. 9. Result of distribution of maximum detection range during five years.

1.45 % 발생하였다. 나아가 그림 10은 5년간 일별 경향성을 나타낸 결과이다. 그림 7과 비교 시 상대적으로 큰 굴절률을 가지는 겨울철에 최대탐지거리가 짧아지며, 반대로 굴절률이 작은 여름철에 가장 긴 최대탐지거리를 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 굴절률의 경향성에 비해 중간 층들의 영향성까지 포함되어 계산된 최대탐지거리의 경향성은 편차가 랜덤 특성을 가진다. 하지만 1년 단위의 큰 변화를 보면 상대적으로 겨울에 길고, 여름에 짧은 경향성은 유지되는 것을 볼 수 있다.

계절별 특성을 좀 더 상세히 분석하기 위해 굴절률과 동일하게 사계절로 구분하여 최대탐지거리와 표준편차를 보았고, 그 결과는 그림 11과 같다. 5년 평균의 경우 여름에 약 225.85 NM으로 가장 긴 거리를 가졌고, 겨울에 약 219.81 NM으로 가장 짧은 거리의 성능을 나타냈다. 표

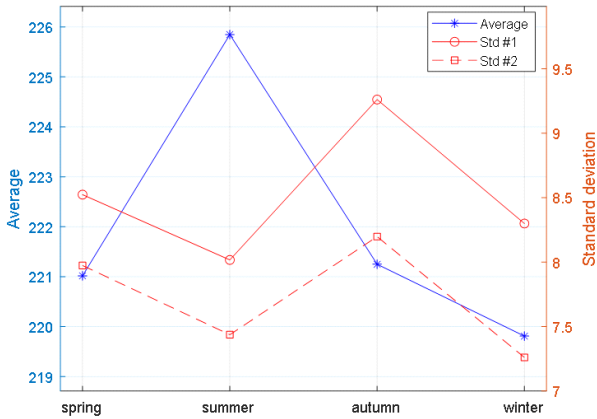


그림 11. 5년간 계절별 최대탐지거리의 평균 및 표준편차 결과

Fig. 11. Result of average and standard deviation of maximum detection range as season during five years.

준편차의 경우, 두 가지 방식으로 계산하여 계절별 특성을 확인하였다. 첫 번째는 계절별 데이터 그대로 사용하여 계절 사이의 변화까지 반영한 표준편차(Std #1)를 계산하였다. 두 번째의 경우, 최대탐지거리의 이동평균을 구해 뺀 후 계절별 표준편차(Std #2)를 계산하여 계절 내에서의 변화를 분석하였다. 그 결과, 동일하게 가을에 가장 큰 표준편차를 가졌고, 상대적으로 여름 및 겨울에 적

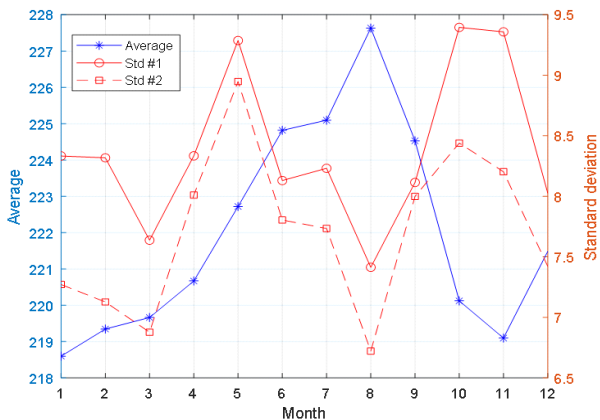


그림 12. 5년간 월별 최대탐지거리의 평균 및 표준편차 결과

Fig. 12. Result of average and standard deviation of maximum detection range as month during five years.

은 표준편차를 가졌다. 나아가 월별 변화를 보았을 때 그림 12와 같이 평균의 경우 8월에 가장 먼 탐지거리가 형성되었으며, 5월 및 10, 11월에 상대적으로 큰 표준편차를 가졌다. 반대로 1월에 가장 짧은 탐지거리와 3월 및 8월에 상대적으로 적은 표준편차를 가지는 것을 보였다.

레이더 운용 시 안정되고 설계(목표치)와 동일한 성능으로 운용되는 것이 중요하다. 레이더 성능에 변화를 주는 원인은 많이 있지만, 굴절을 측면에서만 보았을 때 여름철 적은 표준편차와 긴 최대탐지거리를 가졌으나, 이는 클러터 영향, 오차 발생 등 다른 레이더 성능을 저하시킬 위험성이 있다. 반면 겨울철의 경우, 설계된 최대탐지거리와 적은 표준편차로 안정된 레이더 성능을 가지는 것을 볼 수 있었다.

나아가 M&S 도구를 통해 동일한 성능을 가진 레이더로 다른 위치의 운용환경을 반영하여 5년간 성능을 분석해보면 그림 13과 같다. 기존 위치(#1)에서의 레이더 성능에 비해 새로운 위치(#2)에서 레이더를 운용하면 동일한 성능에도 현저히 떨어진 최대탐지거리의 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. 평균 최대탐지거리는 약 12 NM이 줄었으며, 표준편차의 경우, 약 5 NM 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 서로 다른 위치에 따른 주변 지형, 레이더 운용

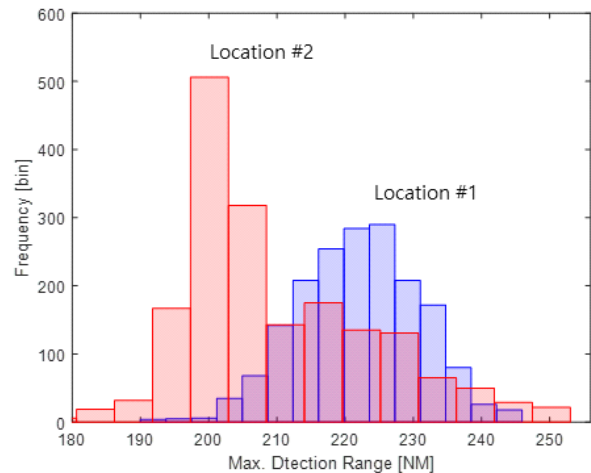


그림 13. 5년간 레이더 운용 위치에 따른 최대탐지거리의 분포 결과

Fig. 13. Result of distribution of maximum detection range during five years according to location of the radar.

고도 그리고 대기 환경 차이에 의해 발생한 차이로, 이는 레이더 운용 위치의 환경 반영의 필요성을 의미한다. 따라서 레이더 분석 시 필히 해당 위치의 운용 환경을 고려해야 보다 더 정확한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

만일 해외의 고도별 기압/온도/이슬점온도 환경 데이터 입력한다면 본 도구를 통해 국내뿐만 아니라, 해당 레이더의 해외 운용 성능 분석까지 가능할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

전파는 대기의 굴절률에 따라 전파되는 경로가 달라진다. 레이더로부터 방사된 전파는 각 층의 서로 다른 굴절률을 지나면서 전파 방향이 상대적으로 위로 휘거나 아래로 휘기도 하고, 일정 층에 갇혀 방사되기도 한다. 대기의 굴절률은 매순간 달라져 예측하기 힘들며, 측정 또한 쉽지 않다. 이러한 대기에 따른 레이더 성능 변화는 레이더가 설계에 맞는 성능을 내지 못하게 되기 때문에 필히 설계 시 고려해야 할 부분이다. 본 논문에서는 이를 위해 국내 대기 환경을 반영한 레이더 성능 분석도구를 개발하여 과거 굴절률의 경향성 및 그에 따른 레이더 성능 변화를 분석하였다.

분석도구는 국내 기상청 데이터를 입력으로 고도에 따른 굴절률을 계산하고 이를 APM을 통해 전파 손실을 계산한다. 레이더 M&S 모델은 계산된 전파 손실을 통해 레이더 성능을 계산한다. 이때 굴절률은 기온, 기압, 이슬점 온도를 통해 계산되며, 국내 기상관측소 중 한 곳을 선정하여 실측 데이터를 활용하였다. 레이더의 경우 이상적인 상황에서 최대탐지거리 220 NM의 성능을 가지는 레이더로 모의하였다.

그 결과, 종합적으로 보면 겨울철에 높은 굴절률을 가졌다가 여름에 감소하는 형태의 경향성을 보였다. 그 반대로 최대탐지거리의 경우 겨울철에 짧은 최대탐지거리를 가졌다가 여름철에 증가하는 형태를 가졌으며, 이러한 변화는 매년 주기적으로 반복된다. 또한 계절별 표준편차를 보았을 때 여름과 겨울에 낮은 표준편차를 가지는 것을 보였다. 월 중에서는 8월에 가장 긴 최대탐지거리와 낮은 표준편차를 가졌으며, 5월 및 10월, 11월에 높은 표준편차를 가졌다. 220 NM의 성능으로 설계한 레이더는 5

년간 목표 거리의 약 10 %에 해당되는 성능 변화의 비중을 보면 200 NM 이하는 약 0.78 %, 240 NM 이상은 약 1.45 %로 발생하였다. 이러한 대기 상태에 따른 레이더 성능 변화는 측정오차 및 클러터 신호 증가, 표적 신호 감쇠 등 다양한 현상이 발생한다. 또한 동일한 레이더 성능으로 다른 지역의 운용 환경을 반영하여 분석한 결과, 해당 지역의 지형, 대기 등의 차이로 레이더 성능이 저하되는 것을 볼 수 있었다.

이러한 결과로 토대로 레이더 운용 장소의 환경을 반영한 레이더 성능 분석의 필요성을 보았고, 나아가 레이더 마진 설계 시 활용하여 안정적인 레이더 설계/운용에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. H. Lee, "Radar's role and development prospects," *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 8, no. 1, pp. 2-28, Mar. 1997.
- [2] M. Skolnik, "Radar in the twentieth century," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 15, no. 10, pp. 27-46, Oct. 2000.
- [3] M. H. Park, W. J. Jeon, H. S. Kim, S. W. Kwon, H. W. Moon, and K. W. Lee, "Radar performance variation according to the change of atmospheric refractive index," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 8, pp. 743-750, Aug. 2021.
- [4] Korea Meteorological Administration [KMA], "Wether data service open MET data ortal." Available: <http://data.kma.go.kr>
- [5] H. W. Moon, M. H. Jeon, W. J. Kim, S. K. Oh, J. H. Lee, and S. W. Kwon, et al., "Development of exponential model of Korea for improved altitude estimation performance of high-altitude target at radar system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 7, pp. 831-839, Jul. 2012.

- [6] B. R. Bean, G. D. Thayer, "Models of the atmospheric radio refractive index," *Proceedings of the IRE*, vol. 47, no. 5, pp. 740-755, May 1959.
- [7] B. R. Bean, G. D. Thayer, *CRPL Exponential Reference Atmosphere*, Washington, DC, U.S. Department of Commerce, 1959.
- [8] A. E. Barrios, W. L. Patterson, "Advanced propagation model(APM) ver. 1.3.1 computer software configuration item(CSCI) documents," 2002. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA408521>

- [9] A. E. Barrios, "Considerations in the development of the advanced propagation model(APM) for U.S navy applications," in *2003 Proceedings of the International Conference on Radar*, Adelaide, Sep. 2003, pp. 77-82.
- [10] H. V. Hitney, "Hybrid ray optics and parabolic equation methods for radar propagation modeling," 1992. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA262855>
- [11] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.

박 명 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

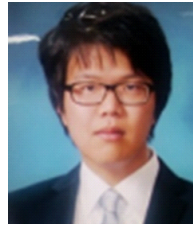
<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학
학과 (공학사)
2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정
보공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 지능형SW
연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 체계설계, M&S, 안
테나, 전파환경, 전파전파 등

전 우 중 [LIG넥스원/선임연구원]

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



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

김 정 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4720-1374>



2004년 2월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학사)
2011년 2월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학석사)
2017년 2월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학박사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 지능형SW
연구소 수석연구원

[주 관심분야] 빔 포밍, 영상 레이더, 레이더 신호처리 등

권 세 웅 [LIG넥스원/수석연구원]

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



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학
사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학
과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과
(공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구
소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등

김 상 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2923-1788>



2002년 2월: 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)

2017년 2월: 고려대학교 국방기술경영학과 (공학석사)

2007년 4월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 체계설계, 사격통제체계, 구동장치, 진동/충격/소음 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