

국내 대기 관측 데이터를 활용한 레이다 성능 분석

Analysis of Radar Performance Using Measured Domestic Atmospheric Data

박명훈 · 전우중 · 문현욱 · 권세웅 · 김상현 · 이기원

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

요 약

본 논문에서는 M&S(modeling and simulation) 모델을 통해 대기상태에 따른 레이다 성능 변화를 분석하였다. 대기를 구성하는 각 층의 굴절률은 시간과 장소에 따라 서로 다르며, 굴절률에 따라 서로 다른 전파환경을 구성하여 레이다 성능 변화를 발생시킨다. 따라서 굴절률을 반영한 레이다 성능 예측 및 분석은 매우 중요하며, 이를 위해 국내 대기 환경을 반영한 지수 모델과 실제 측정된 데이터(1년)를 활용하는 관측 데이터 모델을 사용하였다. 전파 환경의 경우, APM(advanced propagation model)을 통해 전파 손실을 계산하고, 레이다 및 표적 M&S 모델을 이용하여 최종 레이다 성능 변화를 분석하였다. 그 결과, 최대탐지거리의 평균과 표준편차를 보았을 때 지수 모델은 약 227.30 NM(421 km), 3.64 NM(6.74 km)이며, 관측 데이터 모델은 약 220.31 NM(408 km), 8.99 NM(16.65 km)으로 분석되었고, 겨울보다 여름에 최대 탐지거리가 증가함을 알 수 있었다.

Abstract

In this study, radar performance variations were analyzed using a modeling and simulation (M&S) model according to atmospheric conditions. The refractive index of each layer constituting the atmosphere was configured with different values depending on the time and place. Radio waves propagate differently depending on the refractive index and radar performance changes. Therefore, predicting and analyzing the radar performance reflecting the refractive index is crucial. An exponential model that reflects the domestic atmospheric environment and a measured data model using actual observed data (one year) was used to analyze the radar performance by reflecting atmospheric conditions. In addition, the variation in radar performance according to atmospheric conditions was analyzed using an advanced propagation model (APM), which analyzes the radio wave environment, radar, and target M&S models. As a result, the average and standard deviation of the maximum detection range were analyzed as about 227.30 NM (421 km), 3.64 NM (6.74 km) for the exponential model and about 220.31 NM (408 km), 8.99 NM (16.65 km) for the measured data model and the maximum detection range was analyzed longer in summer than in winter.

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

I. 서 론

레이다는 대기 중으로 전파를 방사하여 표적에 반사되어 들어오는 신호를 통해 표적의 위치 정보를 파악한다.

LIG넥스원(주)(LIG NEXI Co., Ltd.)

· Manuscript received February 13, 2023 ; Revised February 28, 2023 ; Accepted April 17, 2023. (ID No. 20230213-015)

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

이때 전파는 지형과 대기상태에 따라 경로가 바뀌면서 손실이 발생한다. 대표적으로 지형의 경우, 차폐가 발생하여 표적에 전파가 도달하지 못해 탐지를 못하는 경우가 발생하고, 대기상태의 경우 굴절률이 시간과 장소에 따라 실시간으로 달라져 전파 경로가 대기층마다 달라져 고도오차 등의 손실이 발생한다^{[1]~[3]}. 지형에 의한 손실은 레이더 운용 위치에 따라 정해지며, 불가피한 부분이지만 대기상태에 의한 손실의 경우 대기 특성을 분석하여 레이더 성능 변화를 예측하고 그에 맞는 레이더 운용 방식을 사용함으로써 성능 저하를 방지할 수 있다.

전파에 영향을 주는 대기상태는 크게 **standard, normal, sub, super, ducting**으로 구분된다. 각 대기상태에 따라 전파 결과는 달라진다. 대표적으로 **sub**의 경우 전파 경로가 위로 휘는 현상이 나타나 레이더 최대탐지거리가 짧아지고 클러터 영향은 줄어든다. 반면 **super**의 경우 전파 경로가 아래로 휘어 최대탐지거리가 멀어지지만 클러터 영향이 증가하는 현상이 나타난다. **Standard**와 **normal**을 제외하고 나머지 대기상태를 이상대기로 표현하며, 이상대기시 공통적으로 고도 오차가 발생한다. 이렇게 레이더 성능에 중요한 요소인 대기상태는 굴절률의 크기에 따라 구분할 수 있다. 하지만 레이더 운용 사이트에서 고도에 따른 굴절률을 측정하기 어려워 이를 모델링한 연구가 다각도로 이루어졌으며, 대표적으로 표준 대기모델, **CRPL** 지수 모델, 한국형 지수 모델이 있다^{[4]~[6]}. 특히 한국형 지수 모델의 경우 국내 기상 관측소 데이터 정보를 이용하여 한국의 지역적 특성을 잘 반영한 모델이다. 이때 활용되는 관측소 데이터 정보는 라디오존데를 띄워 고도별 기압, 기온, 이슬점온도를 측정한 데이터이다. 이 정보를 이용하여 각 층을 구성하는 굴절도를 계산할 수 있고, 층간의 굴절도 차이로 굴절률을 산출할 수 있다.

대기상태에 따라 레이더 성능 변화를 분석하기 위해선 각 층의 굴절률을 반영한 전파 상태를 계산하는 모델이 필요하다. 본 논문에서는 **APM**을 이용하여 대기상태에 따른 레이더 성능 변화를 모의하였다. 한반도에 설치된 특정 관측소를 기준으로 1년간 실제 측정한 데이터를 이용하여 **APM**을 통해 전파 상태를 계산하고, 표적 기동과 레이더 운용을 모의하는 **M&S** 모델을 통해 레이더 성능을 분석하였다. 특히 한국형 지수 모델을 사용한 레이더

성능 결과와 관측 데이터를 그대로 사용한 결과를 비교하여 각 분석 방법에 의한 레이더 성능 변화를 도출하였다. 이때 분석 척도로는 레이더 주요 성능 중 하나인 최대 탐지거리로 하였다. 이를 위해 II장 본문에서는 한국형 지수 모델과 관측 데이터 사용의 개념을 설명하고, III장 결과에서는 두 방법에 의한 레이더 성능 변화를 비교 분석하여 기술하였다.

II. 본 론

2-1 전파 굴절도

전파의 경로를 결정하는 전파 굴절도는 식 (1)과 같이 대기 굴절률을 통해 구할 수 있다. 국내 기상 관측소에서 라디오존데를 통해 고도별 온도, 압력, 이슬점 온도의 정보를 관측한다. 전파 굴절도는 식과 같이 온도, 압력, 수증기압으로 구할 수 있으며^[7], 수증기압과 이슬점 온도는 식 (2)와 같은 관계를 가진다^[8].

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

P : 압력(hPa) e : 수증기압(hPa)
 T : 온도(K) N : 전파 굴절도(N-unit)

$$e = 6.112 \left(\exp \left(\frac{17.67 T_d}{T_d + 243.5} \right) \right) \quad (2)$$

T_d : 이슬점 온도(°C)

실측 데이터로부터 계산된 각 층의 굴절도 차이로 굴절률이 정해지며 표 1과 같은 기준으로 대기상태를 구분할 수 있으며 그림 1과 같이 전파 경로가 달라진다. 이때 전파 상태를 보다 편리하게 구분하기 위해 식 (3)을 통해 수정된 굴절률(M)을 사용하면 0 이하일 경우 전파가 특정 층에 갇히는 현상이 발생하는 **ducting**, 157 이상일 경우 전파 경로가 위로 휘는 **sub**로 구분되며 0~79 사이는 전파 경로가 아래로 휘는 **super**로 구분할 수 있다. 하지만 이 수치는 표현을 위한 경계값으로 79~157 사이의 **normal** 대기라도 **super**와 **sub**에 가까운 수치일 경우 전파 경로는 확연히 달라질 것이다.

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 |

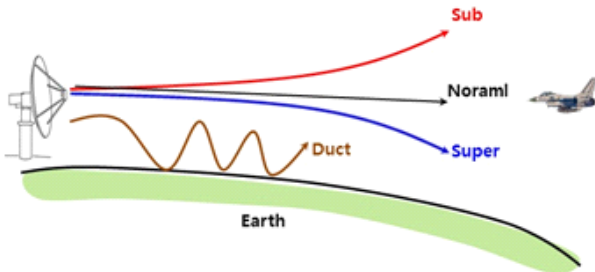


그림 1. 굴절률에 따른 전파전파 특성

Fig. 1. Concept of wave propagation according to refractive gradients.

$$M(h) = N(h) + 0.157 \times h \quad (3)$$

h : 고도 (m) N : 굴절도 (N-unit)

M : 수정된 굴절도 (M-unit)

2-2 관측소 데이터 및 지수 모델

그림 2는 관측소(오산)에서 특정 연도(2016년) 중 하루의 측정한 압력, 온도, 이슬점 온도를 고도별 굴절도를 계산하여 가시화한 결과 예시이다. 고도별 각 층별로 서로 다른 대기상태를 보이고 있으며, normal 대기에서도 서로 다른 굴절률을 가지는 것을 볼 수 있다. 특히 약 5,000 ft 부근에서 trap(ducting), sub, super층이 발생하여 굴절률 변화가 심하게 발생한 것을 볼 수 있다.

이 결과를 토대로 본 연구에서는 덕팅부터 아굴절까지 굴절률의 변화가 가장 많은 구간을 정하기 위해 일정 고도 간격으로 나눠 1년 동안의 굴절률 분포를 확인하였고, 그 결과는 표 2 및 그림 3과 같다.

5 kft 간격으로 고도를 나눠 해당 고도에서의 굴절률의

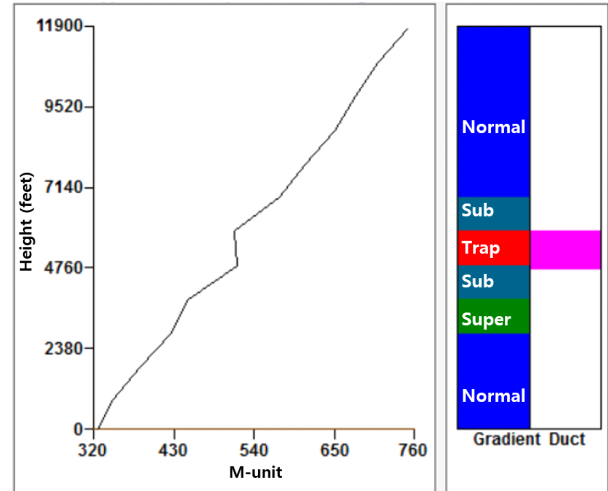


그림 2. 고도별 굴절률 결과

Fig. 2. Result of refractive gradients as altitude.

표 2. 고도별 각 대기상태의 비율 결과

Table 2. Result of percentage of each atmosphere condition as altitude.

| Altitude [kft] | Ducting | Super | Normal | Sub |
|----------------|---------|---------|---------|--------|
| 0~5 | 3.62 % | 15.68 % | 74.32 % | 6.38 % |
| 5~10 | 1.21 % | 8.53 % | 83.86 % | 6.40 % |
| 10~15 | 0.11 % | 3.77 % | 86.21 % | 9.91 % |
| 15~20 | 0.20 % | 0.69 % | 94.05 % | 5.06 % |
| 20~25 | 0 | 0.32 % | 96.70 % | 2.99 % |
| 25~30 | 0 | 0 | 99.17 % | 0.83 % |
| 30~35 | 0 | 0 | 99.78 % | 0.22 % |
| 35~40 | 0 | 0 | 100 % | 0 % |
| 40~45 | 0 | 0 | 100 % | 0 % |
| 45~100 | 0 | 0 | 100 % | 0 % |

분포를 보았을 때 고도가 높아질수록 대기상태는 안정화되어 normal 대기에 수렴한다. 하지만 고도가 낮을수록 대기상태의 변화(굴절률의 변화)가 가장 활발하게 이뤄지는 것을 볼 수 있다. 특히 약 1 km 내에서 대기상태의 변화가 가장 큰 분포를 가져 해당 구간을 중요 고도로 설정하였다. 이러한 굴절률 변화는 전파 경로에 많은 변화를 주기 때문에 이에 대한 모델링이 필요하다.

고도에 따른 굴절률 변화를 모델링하기 위해 다양한

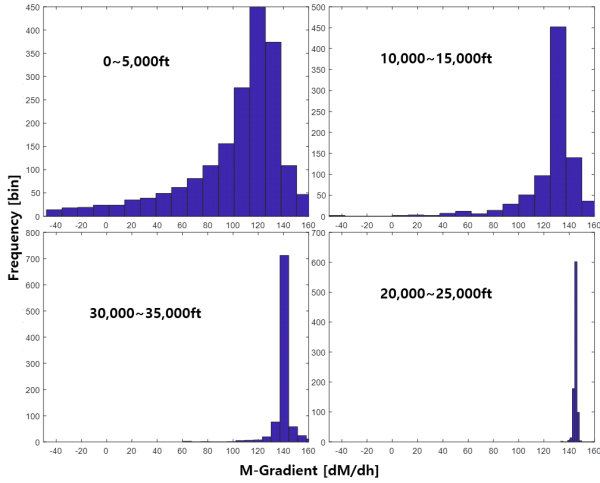


그림 3. 고도별 굴절률 분포 결과

Fig. 3. Result of distribution of refractive gradients as altitude.

모델이 연구되었다. 대표적으로 전 세계 기상 관측소 데이터를 평균한 표준 대기 모델이 있다. 하지만 이 모델의 경우 공간과 시간에 따라 달라지는 대기 요소를 반영할 수 없는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 굴절률 변화를 표면 굴절도와 굴절도 감쇠율을 이용하여 지수 함수로 나타내는 지수 모델이 있다^{[5],[6]}. 지수 모델은 식 (4)로부터 1 km에서의 전파 굴절도를 이용하여 구해지는 지수 감소 계수(c_e)를 통해 식 (5)와 같이 고도별 전파 굴절도를 구할 수 있다.

$$c_e = \ln \frac{N_s}{N_{1km}} = \ln \frac{N_s}{N_s + \Delta N} \quad [km^{-1}] \quad (4)$$

$N_{s, 1km}$: 표면 및 1 km의 굴절도[N]

ΔN : 1 km까지의 굴절도 감쇠율[N/km]

$$N = N_s \exp(-c_e h) \quad (5)$$

h : 고도(km)

지수 모델에 필요한 표면 굴절도와 굴절도 감쇠율의 경우 레이더 사이트에서 표면 굴절도는 측정 가능하지만, 굴절도 감쇠율은 상대적으로 측정하기 힘들다. 하지만 본 연구에서는 국내 기상 관측소에서 측정한 데이터를 통해 표면 굴절도와 1 km에서의 감쇠율을 계산하여 지수 모델

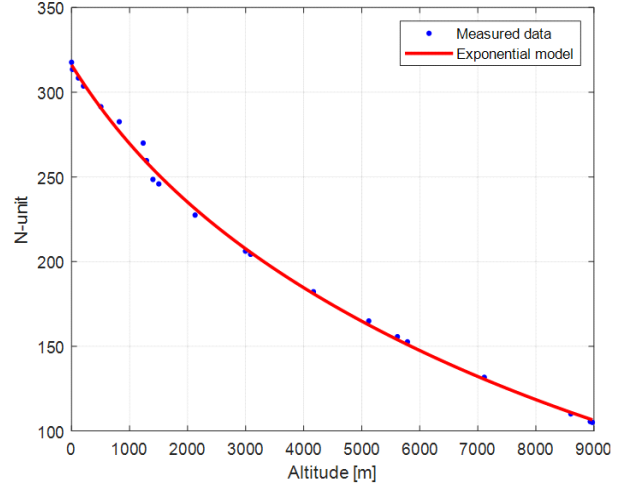


그림 4. 지수 모델의 대기 굴절률 피팅 결과

Fig. 4. Atmospheric refractive index fitting result for exponential model.

에 활용하였다. 그림 4와 같이 실측 데이터로부터 지수형태로 선형 최소제곱 피팅 방법을 통해 만들어진 지수 모델의 결과는 국내 관측소 데이터를 활용하였기 때문에 국내 기상 환경을 반영한 결과이다.

2.3 레이더 M&S 모델

레이더 성능 분석에서 가장 중요한 부분은 운용 환경 반영 여부이며, 이를 위한 많은 연구가 진행되어 왔다^{[1],[6],[7]}. 본 연구에서는 APM을 활용하여 대기 상태를 반영한 레이더 성능을 분석하였다^{[9],[11]}. 크게 모델은 기상 모델, APM, M&S 모델 3가지로 구성되어 있으며, 그림 5와 같은 순서로 구성된다. 기상 모델은 지수 모델과 국내 기상청 데이터를 그대로 활용하는 관측 데이터 모델로 구성된다. 이 두 모델은 관측소의 데이터를 받아 레이더 운용 환경 정보(고도별 굴절률)를 만들어낸다. 이 정보는 APM 모델을 통한 전파 환경을 계산하는 데 사용된다. 전파 환경은 거리 및 고도별 전파 손실로 구성되어 있으며, 주파수 및 안테나 빔 등의 레이더 제원과 대기 상태가 반영된다. 마지막 M&S 모델은 표적 모델과 레이더 모델로 구성되어 있으며, APM 모델로부터 전파 손실값을 받아 식 (6)을 통해 최종 최대탐지거리를 계산한다^{[11],[9]}.

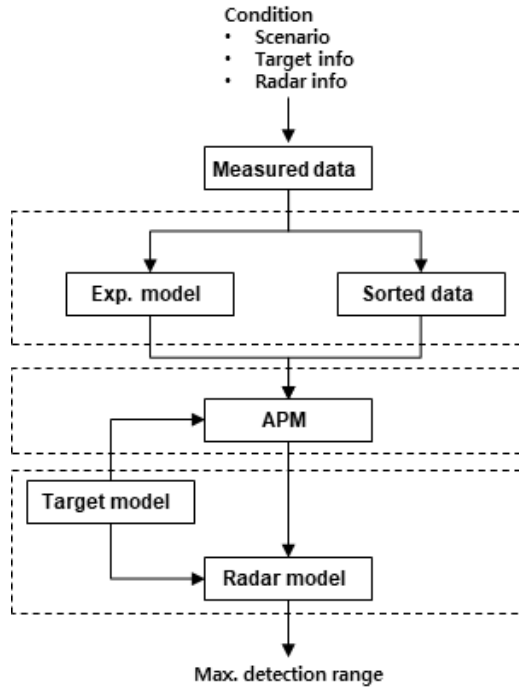


그림 5. 레이더 성능 분석 흐름도

Fig. 5. The flow diagram of analysis for radar performance.

$$R = \sqrt[4]{\left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \tau_p N_p \sigma_t}{(4\pi)^3 SNR k T L_p L_{sys}} \right)} \quad (6)$$

P_t : 송신전력(W) N_p : 펄스 수
 G_t : 송신이득(W/W) σ_t : RCS(m²)
 G_r : 수신이득(W/W) SNR: 신호대잡음비
 λ : 파장(m) L_{sys} : 시스템손실(W/W)
 τ_p : 펄스폭(sec) L_p : 대기손실(W/W)
 κ : Boltzman's constant[W/(Hz K)]
 T : 시스템 잡음 온도(K)

III. 결 과

지수 모델과 관측 데이터 모델을 활용하여 각각 국내 대기 환경을 반영한 레이더 성능 변화를 분석하기 위해 16년도 오산 관측소 오전(00 UTC) 데이터를 사용하였다. 지수 모델과 관측 데이터 모델을 비교하기 위해 각각 표면 굴절도 및 1 km에서의 굴절률을 분석하였다. 먼저 표면 굴절도의 경우, 지수 모델은 관측소 데이터를 지수 형

태로 피팅하여 표면 굴절도를 산출하였고, 관측 데이터 모델은 측정값 중 가장 낮은 고도의 데이터를 사용하였다. 그 결과는 그림 6과 같으며, 전반적으로 지수 모델보다 관측 데이터 모델이 높은 값을 가지며 1년 주기의 경향성은 동일하다. 여름철에 표면 굴절도가 높고, 겨울철에는 낮은 값을 가진다.

굴절률의 경우, 지수 모델에서는 피팅한 지수 형태의 데이터에서 1 km까지의 굴절률을 계산하였고, 관측 데이터 모델은 측정된 데이터 중 1 km에서 가장 가까운 데이터를 이용하여 굴절률을 계산하였다. 두 모델 결과, 그림 7과 같이 1년 주기의 전반적인 경향성은 겨울철 높은 굴

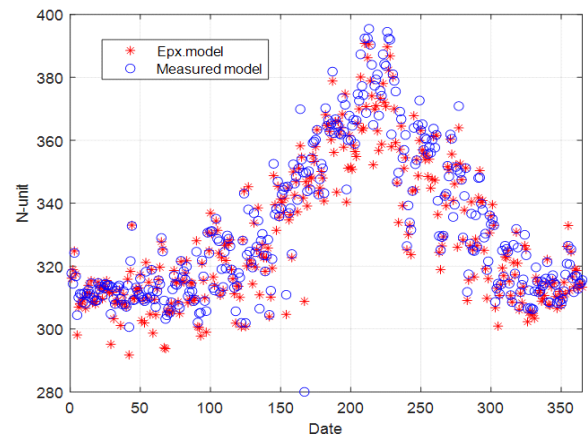


그림 6. 표면 굴절도 결과(1년)

Fig. 6. Result of surface refractiveness during one year.

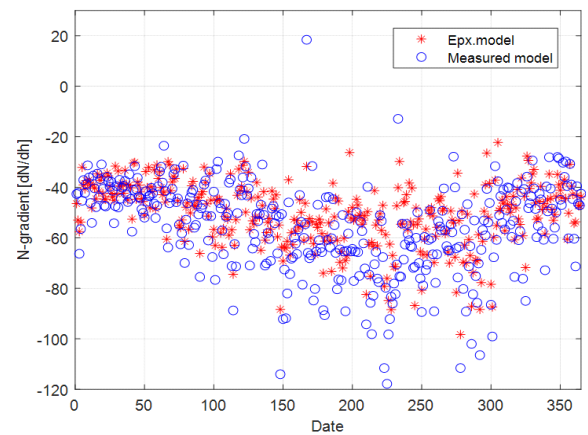


그림 7. 1 km에서의 굴절률 결과(1년)

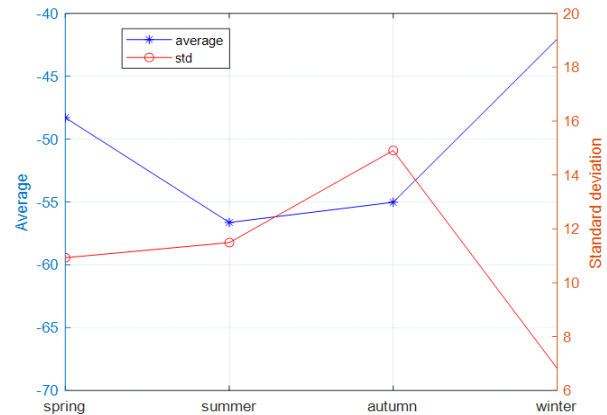
Fig. 7. Result of refractive gradients at 1 km during one year.

절절을 가지고 여름철 상대적으로 낮은 굴절률을 가지는 동일함을 보였다. 또한 관측 데이터 모델이 지수 모델보다 더 낮은 굴절률 분포를 가지는 특성을 보였다.

굴절률의 경향성을 계절별 특성으로 나눠 분석하기 위해 두 모델의 결과를 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월) 그리고 겨울(12~2월)로 구분하여 평균과 표준편차를 구했다. 계절별 평균과 표준편차를 구하기 위해 연속된 시간을 이동평균(moving average)을 통해 구할 수 있지만 모수가 부족하여 대표할 수 있는 경향성을 나타내는 참조값(window)은 60일(두 달) 이상으로 데이터 왜곡의 위험성을 보였다. 나아가 계절의 변화에 따른 굴절률의 대세의 변화뿐만 아니라, 떨림 자체 또한 계절별 특성으로 판단하여 본 논문에서는 데이터 원본을 통해 각 계절에 해당하는 월별로 구분하여 분석하였다. 그 결과는 그림 8과 같으며 두 모델이 동일하게 평균 굴절률의 경우 여름철에 가장 낮고 겨울철에 가장 높게 형성되었다. 또한 봄과 가을을 비교할 때 봄이 좀 더 높은 굴절률을 형성하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 표준편차에서는 다른 경향성을 가졌다. 가장 낮은 값을 가지는 계절은 겨울로 동일하나 지수 모델은 가을, 관측 데이터 모델은 여름에 높은 표준편차를 가지는 것을 보였다.

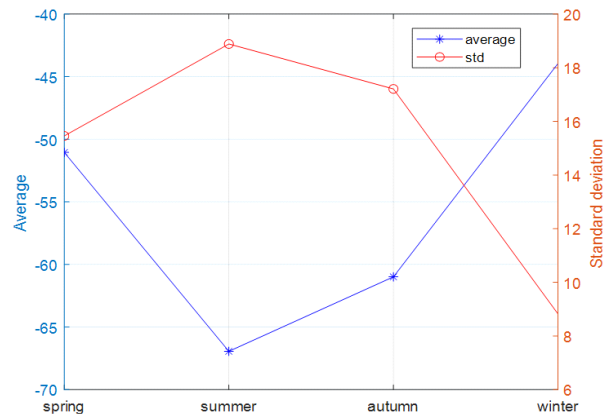
굴절률이 상대적으로 작은 것은 전파 방향이 아래로 휘는 것을 뜻하며 이는 레이더의 최대탐지거리를 증가시키는 효과를 가져 온다. 반대로 상대적으로 큰 굴절률은 위로 휘어 최대탐지거리가 줄어드는 효과가 발생한다. 그림 8에서와 같이 굴절률 분석에 따르면 여름철에 레이더를 운용할 시 설계보다 더 먼 최대탐지거리를 가지며, 겨울철에는 짧은 최대탐지거리가 형성될 것으로 예측할 수 있다. 이를 확인하기 위해 M&S 모델을 통해 레이더 제원과 1년간 굴절률을 반영하여 레이더의 최대탐지거리 변화를 분석하였다.

이를 위해 1년의 대기 정보를 이용하여 APM을 통해 대기 상태에 따른 전파 손실을 계산하고, 이 값을 M&S 모델에 입력하여 레이더 운용 및 표적 기동에 따라 수신 신호를 계산하여 최대탐지거리를 산출하였다. 그 결과는 그림 9와 같으며, 굴절률 분석을 통한 예측과 동일한 결과를 가졌다. 다른 계절에 형성된 최대탐지거리에 비해 여름철 전반적인 거리가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 여



(a) 지수 모델

(a) Exponential model



(b) 관측 데이터 모델

(b) Measured data model

그림 8. 계절별 1 km 굴절률 평균 및 표준편차 결과

Fig. 8. Result of average and standard deviation of refractive gradients at 1 km as season.

름에 형성되는 굴절률이 다른 계절에 비해 표면에서는 높고 평균이 작아 전파의 경로가 상대적으로 아래로 휘거나 ducting 발생 가능성이 있어 최대탐지거리가 길어짐을 뜻한다. 반대로 겨울철의 경우 상대적으로 큰 굴절률에 의해 전파 경로가 위로 휘어 최대탐지거리가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 또한 한 해의 최대탐지거리의 평균을 구해보면 지수 모델은 약 227.30 NM(421 km)이고, 관측 데이터 모델은 220.31 NM(408 km)으로 약 7 NM(13 km)의 차이로 지수 모델이 사계절 전반적으로 먼 최대탐지거리를 가지는 것을 볼 수 있다.

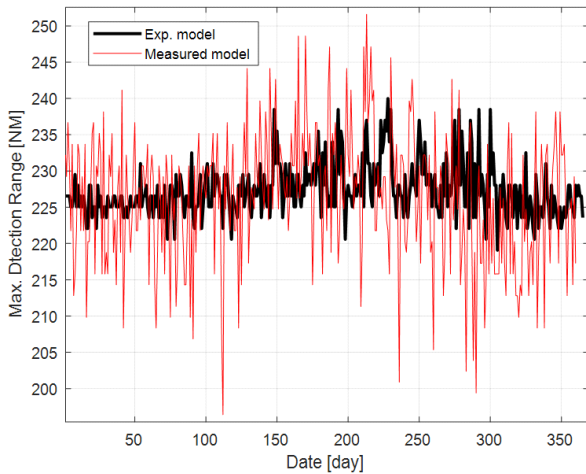


그림 9. 최대탐지거리 결과(1년)

Fig. 9. Result of maximum detection range during one year.

또한 상대적으로 관측 데이터 모델의 일일 변화량이 많은 것으로 분석되며, 그 결과는 그림 10과 같다. 각 모델별 최대탐지거리의 표준편차는 지수 모델의 경우 3.64 NM(6.74 km), 관측 데이터 모델은 8.99 NM(16.65 km)이다. 이는 관측 데이터 모델이 모든 층을 실제 측정된 데이터를 활용하여 실제 대기 변화에 따른 특성을 더 반영한다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 지수모델과 관측 데이터 모델을 활용하여

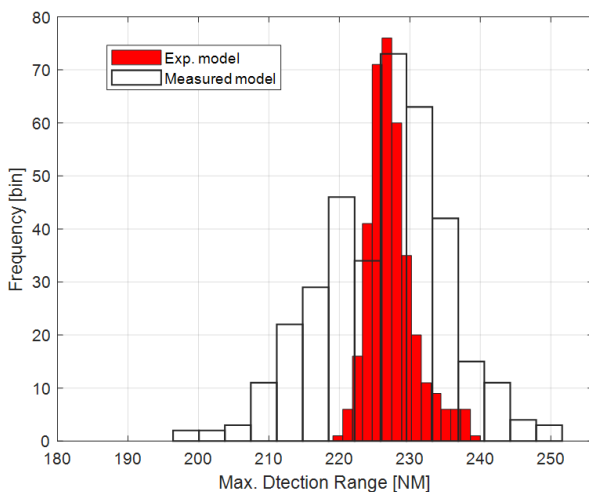


그림 10. 모델별 최대탐지거리 분포 결과

Fig. 10. Result of distribution of maximum detection range as model.

국내 대기환경을 반영한 레이더 성능 변화를 분석하였다. 이를 통해 레이더 설계 및 운용 시 실제 기상 관측 데이터를 활용하여 대기를 반영한 레이더 성능을 분석한다면 보다 더 안정적인 레이더를 운용할 수 있을 것이다. 이때 대기상태를 측정하지 못하거나, 관측된 고도 데이터의 양이 부족할 경우 지수모델을 활용하여 이를 대체할 수 있다. 이러한 분석 방법 및 모델을 통해 과거 연도를 더 확장하여 대기 변화 추이를 분석하고, 그에 따른 레이더 성능 변화 분석을 통해 효율적인 레이더 설계 및 운용이 가능할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

레이더 성능은 제원뿐만 아니라, 운용 환경에 따라 결정되며, 운용 환경에는 대표적으로 지형과 대기상태가 있다. 지형의 경우, 레이더 설치 후 최적화를 통해 성능 저하를 보완하지만 대기상태는 시간과 장소에 따라 실시간 변하기 때문에 이를 예측하고 분석하는 과정이 필요하다.

대기상태는 크게 standard, normal, sub, super, ducting으로 구분할 수 있으며 각 대기상태에 따라 레이더 성능에는 서로 다른 영향을 준다. 또한 각 층마다 형성되는 대기가 서로 다르기 때문에 이를 표현할 수 있는 모델을 통한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 국내 대기 특성을 반영할 수 있는 지수 모델과 1년 동안 실제 대기상태를 관측한 관측 데이터 모델을 활용하였다. 지수 모델의 경우 국내 관측 데이터를 수집할 수 있기 때문에 해당 데이터를 이용하여 지수 형태로 피팅 후 사용하였고, 관측 데이터 모델의 경우 실제 관측소에서 라디오존데를 비양시켜 측정된 대기의 기온, 기압, 이슬점온도를 사용하였다. 이 정보를 통해 각 층별 굴절률을 계산할 수 있으며, 1년 동안의 굴절률 변화를 보면 겨울철에 낮은 표면 굴절도와 높은 굴절률을 가지며, 반대로 여름철에는 높은 표면 굴절도와 낮은 굴절률을 가진다. 이러한 정보는 전파 환경을 분석하는 데 사용되며, 대기상태에 따른 레이더 성능 변화를 분석할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 기상 상태를 표현한 두 모델과 전파 환경을 분석하는 APM, 표적 기동과 레이더 운용을 모의하는 M&S 모델을 구성 및 통합하여 대기상태에

따른 레이더 성능 변화를 도출하였다. 결과로는 레이더 성능 중 중요한 척도인 최대탐지거리로 하였으며, 지수 모델의 경우 평균 227.3 NM(421 km), 표준편차 3.64 NM (6.74 km)이며 관측 데이터 모델은 평균 220.31 NM(408 km), 표준편차 8.99 NM(16.65 km)의 결과를 가졌다. 또한 최대탐지거리가 상대적으로 겨울보다 여름에 더 길게 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 국내 대기 상태를 반영한 레이더 성능 분석 시 관측 데이터 모델을 활용하면 보다 더 정확한 대기상태를 반영한 분석이 가능하며, 대기상태 데이터를 관측 및 활용하지 못할 경우 지수 모델을 통해 국내 대기 변화에 따른 분석이 가능하다.

본 논문과 같이 대기상태를 반영한 레이더 성능 변화 예측 및 분석 과정을 레이더 설계 시 반영할 경우 보다 안정적인 레이더 운용을 기대할 수 있다. 또한 연도를 더 확장하여 과거 대기 변화에 따라 레이더 성능 변화를 분석하여 경향성 파악을 통해 향후 국내 대기 환경의 변화에 따른 레이더 성능 변화를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [2] E. A. Haering, S. Whitmore, "FORTRAN program for analyzing ground-based radar data: Usage and derivations, version 6.2," Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration, 1995.
- [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] *Reference Standard Atmospheres*, ITU-R P.853-3, Mar. 1999.
- [5] 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.
- [6] B. R. Bean, G. D. Thayer, *CRPL Exponential Reference Atmosphere*, Washington, DC, U.S. Department of Commerce, Oct. 1959.
- [7] P. J. W. Debye, *Polar Molecules*, Mineola, NY, Dover, 1958.
- [8] 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.
- [9] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and H. W. Moon, 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.
- [10] E. P. Lam, H. W. Birrell, and J. Magallon, "Performance prediction of firefinder radar using high fidelity simulation," in *2010 IEEE Radar Conference*, Arlington, VA, May 2010, pp. 48-53.
- [11] A. E. Barrios, W. L. Patterson, "Advanced propagation model(APM) ver. 1.3.1 computer software configuration item(CSCI) documents," San Diego, CA, Space and Naval Warfare Systems Center, Aug. 2002.

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, 전파환경, 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, 제어 등

김 상 현 [LIG넥스원/수석연구원]

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



1998년 2월: 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
2015년 2월: 고려대학교 국방기술경영학과 (공학석사)
2007년 4월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 체계설계, 사격통제체계, 구동장치, 진동/충격/소음 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

이 기 원 [LIG넥스원/수석연구원]

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



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

신호처리 등