

국내 고층 기상 측정 데이터 기반 계절 및 지역별 덕트 경향성 분석

Analysis of Seasonal and Regional Duct Tendencies Based on Domestic High-Altitude Meteorological Measurement Data

임창현 · 장도영* · 김남문* · 추호성

Changhyeon Im · Doyoung Jang* · Nammun Kim* · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 국내 고층 기상 측정 데이터를 기반으로 계절 및 지역별 덕트의 경향성을 분석한다. 기상 데이터는 국내 고층 기상대 7곳(백령도, 흑산도, 제주도, 오산, 광주, 북강릉, 포항)에서 과거 9년(2015~2023)간 수집한 데이터를 활용한다. 모든 날짜에 대한 대기 굴절률을 수정 대기 굴절률(M -unit)로 변환하고, M -unit의 변화율(∇M)을 통해 대기 상태(정상, 아굴절, 초굴절, 덕트)를 분류한다. 그중에서, 강한 전파굴절로 인해 레이더 시스템에 치명적인 오탐을 발생시킬 수 있는 덕트 현상의 발생 빈도를 지역, 시간, 날짜에 따라 중점적으로 관찰하였다. 분석 결과에 따르면, 지역을 기준으로 분석했을 때 해안 지역에서 모든 계절에 걸쳐 덕트 발생 확률이 더 높았으며, 계절을 기준으로 분석했을 때 내륙과 해안 지역 모두 가을에 빈번하게 발생하였다. 또한, 시간별로 살펴보면, 오전보다는 오후에 덕트 발생 확률이 높게 나타났다. 이러한 결과를 기반으로 레이더 시스템 운용 시 탐지 오차를 최소화하기 위해 지역 및 날짜별 ∇M 평균값 및 대표 보정 각도를 제안한다.

Abstract

In this study, we analyzed the seasonal and regional duct tendencies using domestic high-altitude atmospheric measurement data. The meteorological data was collected from seven high-altitude meteorological observatories in South Korea (Baengnyeong Island, Heuksan Island, Jeju Island, Osan, Gwangju, Bukgangneung, and Pohang) over the past nine years (2015~2023). The atmospheric refractive index for all dates is converted into the modified atmospheric refractive index (M -unit), and the atmospheric conditions (normal, sub, super, duct) are classified using the M -unit gradient (∇M). Among these, the occurrence of ducts, which can cause critical detection errors in radar systems due to strong refraction, is closely observed by region, time, and date. According to the results, when analyzed by region, the probability of duct occurrence was higher in coastal areas across all seasons, and when analyzed by season, it occurred frequently in fall in both inland and coastal areas. In addition, the probability of duct formation was higher in the afternoon than in the morning. Based on these results, we propose the average ∇M and representative correction angles by region and date to minimize detection errors in radar system operations.

Key words: Refractive Index, Refractivity, M -Unit, Duct Tendency

「이 논문은 2023년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*한화시스템(Hanwha System)

· Manuscript received June 13, 2024 ; Revised July 8, 2024 ; Accepted August 9, 2024. (ID No. 20240613-058)

· Corresponding Author: Doyoung Jang (e-mail: dyjang1224@naver.com)

I. 서 론

최근 군사 분야에서는 먼 거리에 위치한 목표물을 실시간으로 탐지할 수 있는 장거리 레이더 기술에 대한 관심이 증가하고 있다^{[1]~[6]}. 이러한 장거리 레이더를 운용할 때, 지상에 가까운 대기권에서는 고도에 따라 대기 굴절률의 차이가 발생하며 이로 인해 레이더에서 방사된 전파는 직선 경로로 나아가는 것이 아닌, 굴절된 경로로 나아간다^{[7]~[10]}. 이 때, 대기 굴절률은 지역 및 시간, 계절 등에 따라 달라지기 때문에, 레이더에서 방사된 전파의 굴절정도 또한 레이더 운용환경에서의 기상상태에 영향을 받는다. 대기 굴절률에 따른 대기 상태는 크게 정상(normal), 아굴절(sub), 초굴절(super), 덕트(duct)와 같이 4개의 대기 상태로 분류되고, 통상 대부분의 대기 상태는 정상 대기 상태이므로, 레이더 시스템은 정상 대기 상태를 가정하고 운용된다^[11]. 하지만 정상 상태 대비 굴절률이 낮은 아굴절 상태가 발생한 경우 정상 대기 상태에서의 전파 진행 방향보다 상공으로 굴절되며, 레이더 시스템의 탐지 오차를 발생시킨다. 반대로 정상 상태 대비 굴절률이 높은 초굴절 대기 상태인 경우 전파의 진행 방향이 정상 대기 상태에서의 진행 방향 대비 지표면 방향으로 더욱 크게 굴절되며, 이 또한 탐지 오차를 발생시킨다. 특히 덕트 상태의 경우 초굴절 상태보다 지표면 방향으로 큰 굴절을 야기하여 전파가 지표면 부근에서 트래핑되는 현상이 발생하므로 치명적인 탐지 오차를 발생시킬 수 있어 덕트 상태를 파악하는 것이 매우 중요하다. 실시간 대기 상태를 분석하기 위해서는 라디오존데를 활용한 실시간 기상 상태 측정이 요구되며^{[12][13]}, 이는 제한된 장소에서 하루 2~4회만 수행되기 때문에, 넓은 해안 범위에서 운용되는 함정용 장거리 레이더 시스템에 접목하기에는 적합하지 않다. 기존의 국내 대기 상태 분석에 대한 연구 사례들도 있지만 특정 지역에 국한되어 분석하였고, 실시간으로 활용할 수 있는 예측데이터를 제한한 내용은 포함되어 있지 않다^{[14]~[16]}. 따라서 이미 측정된 누적데이터를 기반으로 대기 상태 변화에 대한 경향성을 분석하여 현재 대기 상태를 예측하고, 상황에 따른 대표 보정값을 미리 선정하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 국내 고층 기상 측정 데이터를 기반으

로 지역, 계절 및 시간별 덕트의 경향성을 분석한다. 국내에서 현재 운용되고 있는 7개의 지역(백령도, 흑산도, 제주도, 오산, 광주, 북강릉, 포항)에 위치한 고층 기상대에서 9년(2015~2023)간 오전 9시(00 UTC), 오후 9시(12 UTC)에 측정된 데이터를 추출한다. 이 측정데이터는 측정이 수행되는 기상대의 위치 및 시간에 따라 관측 고도의 범위 및 간격이 달라지므로, 고도에 대한 측정 데이터 보간을 통해 전 지역에서 고도 간격을 일치시킨다. 보간된 데이터를 기반으로 수정 대기 굴절률(M -unit)을 계산하고, 지역(내륙, 해안), 계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 시간(오전, 오후)에 따른 경향성을 분석한다. 이때 장거리 레이더 운용 시 큰 굴절을 야기하여 강한 탐지 오차를 발생시키는 덕트를 위주로 분석하였다. 9년 동안 각 지역, 계절, 시간에 덕트가 발생한 날의 횟수를 조사하고, 각 조건별로 연 단위 평균값을 구한 후 365일로 나누어 덕트 확률을 계산한다. 추가적으로 9년 동안 각 지역에서 날짜별 대기 굴절률의 변화율(∇M)의 평균값을 구하여 레이더 시스템 운용 시 탐지 오차를 최소화하기 위한 대표 보정각도를 제공한다.

II. 국내 고층 기상 관측 데이터 획득

그림 1은 국내의 대기 굴절률 데이터를 획득할 수 있으며, 현재 운용 중인 국내 7곳의 고층 기상 관측소 위치를



그림 1. 국내 고층 기상 관측소 위치

Fig. 1. Location of meteorological observatories in Korea.

나타낸다. 기상 관측소는 4곳의 내륙 지역(북강릉, 오산, 포항, 광주)과 3곳의 해안 지역(백령도, 흑산도, 제주도)에 위치한다. 모든 기상 관측소에서는 오전 9시(00 UTC) 및 오후 9시(12 UTC)에 정기적으로 데이터를 수집하고, 비정기적으로 오후 3시(06 UTC) 및 오전 3시(18 UTC)에도 데이터를 수집한다. 날짜, 지역, 계절에 따른 일반적인 경향을 파악하기 위해 데이터는 2015년부터 2023년까지 9년 간의 데이터를 수집하였다. 해당 기간동안 수집된 데이터의 양과 각 관측소의 좌표는 표 1에 나타내었다.

그림 2는 고층 기상대에서 획득한 대기 굴절률 데이터를 대기 상태별로 분류한 것을 나타낸다. 전파 경로 분석

표 1. 기상 관측소의 위치 및 데이터 샘플 수

Table 1. Location of the meteorological observatories and a number of data samples.

Observatory name	Observatory coordinates	Number of data samples
Baeknyeong Island	(37.97°, 124.63°)	7,132
Osan	(37.10°, 127.03°)	6,663
Bukgangneung	(37.81°, 128.85°)	11,195
Heuksan Island	(34.68°, 125.45°)	7,111
Gwangju	(35.11°, 126.81°)	11,305
Pohang	(36.03°, 129.38°)	7,086
Jeju Island	(33.33°, 126.68°)	6,956

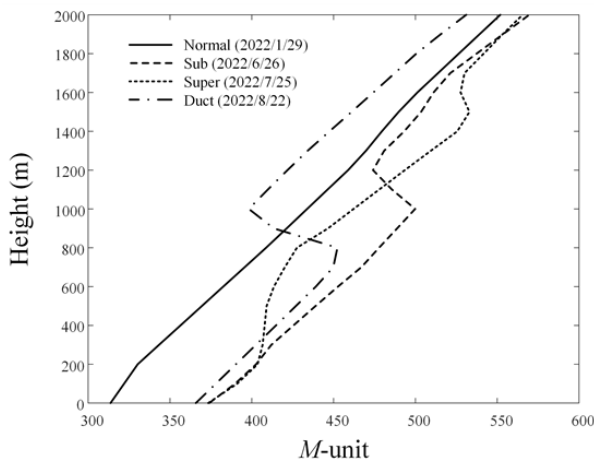


그림 2. 백령도 대기 굴절률 측정 데이터

Fig. 2. Measured atmospheric refractivity data in Baeknyeong island.

을 위해서는 보통 지구의 곡률을 고려한 수정 대기 굴절률 모델인 M -unit을 사용하며, M -unit은 식 (1) 및 식 (2)와 같은 수식을 통해 계산된다^[17].

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + (0.373 \times 10^6) \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

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

N : 굴절률 (N -unit)

M : 수정굴절률 (M -unit)

P : 압력 (hPa)

T : 온도 (K)

e : 수증기압 (hPa)

h : 고도 (m)

대기 상태는 고도에 따른 대기 굴절률의 변화($\nabla M = dh/dM$)에 따라 4가지 상태로 분류되며 각 상태별 ∇M 의 범위는 표 2와 같다^[18].

그림 2에서 2022년 1월 29일 오전 9시에 백령도에서 획득한 데이터(실선)를 살펴보면 모든 관측 범위(0 m < h < 2,000 m)에서 고도에 따른 굴절률의 변화율이 $79 < \nabla M < 157$ 로 정상 대기에 해당한다. 파선으로 표시된 2022년 6월 26일 오전 9시의 데이터는 고도가 $h > 1,700$ m에서 $\nabla M > 157$ 로 아굴절 상태에 속하며 정상 대기 상태보다 전파의 굴절이 약하게 발생한다. 반면, 2022년 7월 25일 오전 9시에 획득한 데이터(점선)는 200 m < h < 800 m에서 $0 < \nabla M < 79$ 로 초굴절의 범주에 속하며 이는 정상 대기 상태보다 더 강한 굴절이 발생함을 의미한다. 마지막으로 쇄선으로 표시된 2022년 8월 22일 오전 9시의 데이터는 고도가 800 m < h < 1,000 m인 범위에서 $\nabla M < 0$ 로 음수값을 가지며, 매우 강한 굴절로 인해 전파가 지표면에 갇혀 나아가는 덕트 현상이 발생함을 의미한다. 이와 같이 관측일에 따라서 서로 다른 대기 상태가 발생할 수 있고, 대기 상태에 의해 전파의 경로 또한 달라질 수 있어 이러한 경향을 사

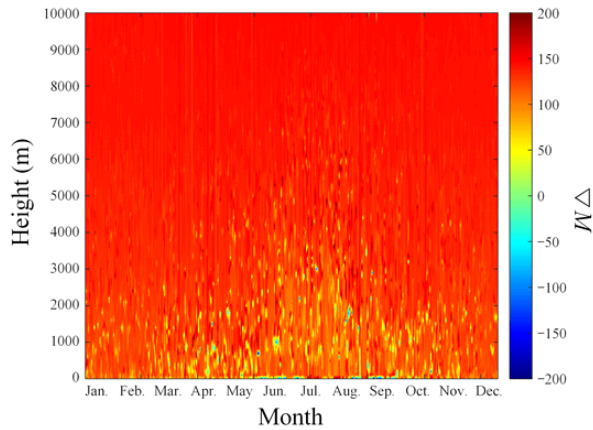
표 2. 대기 상태별 ∇M 의 범위

Table 2. Range of ∇M by atmospheric condition.

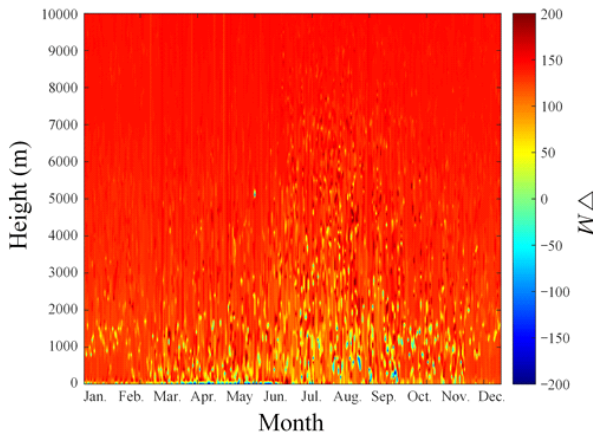
Atmospheric condition	Range of ∇M
Duct	$\nabla M < 0$
Super	$0 < \nabla M < 79$
Normal	$79 < \nabla M < 157$
Sub	$\nabla M > 157$

전에 파악할 필요가 있다.

그림 3은 2022년 오전 9시 내륙 지역(광주)과 해안 지역(흑산도)의 고도에 따른 대기 굴절률의 변화율 ∇M 을 분석한 결과이다. 그림 3(a)는 내륙 지역에 위치한 기상 관측소에서 획득한 데이터를 활용하여 2022년의 1월 1일부터 12월 31일까지 365일의 고도별 ∇M 을 표시한 것이며, 붉은색 영역일수록 대기 굴절률이 약하고 푸른색 영역일수록 강한 대기 굴절률임을 의미한다. 결과를 살펴보면 1년의 관측 시간에 대해서 여름에 전반적으로 푸른색 영역이 넓어짐을 알 수 있고, 반대로 겨울에는 대부분이



(a) 2022년 오전 9시 내륙 지역(광주)
(a) Inland area (Gwangju) at 9:00 AM in 2022

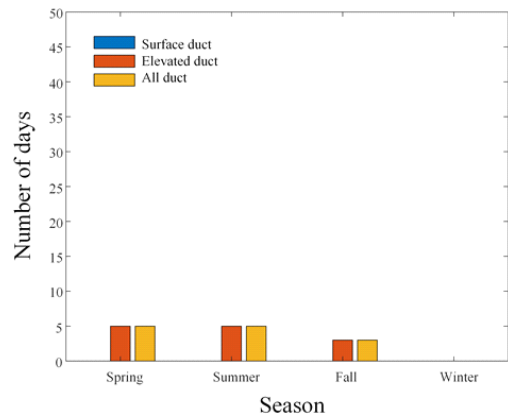


(b) 2022년 오전 9시 해안 지역(흑산도)
(b) Coastal area (Heuksan island) at 9:00 AM in 2022

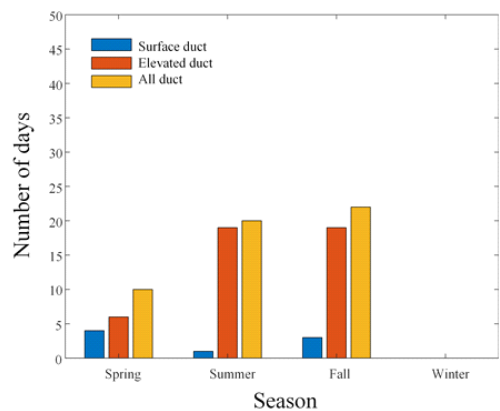
그림 3. 오전 9시 내륙 및 해안 지역 ∇M
Fig. 3. ∇M for inland and coastal areas at 9:00 AM.

붉은색 영역으로 나타난다. 이는 여름의 대기 굴절률이 겨울의 대기 굴절률 대비 일반적으로 더 강하게 나타남을 의미한다. 이는 해안 지역에 대한 결과를 보여주는 그림 3(b)도 동일한 경향을 보이는 것으로 확인된다.

그림 4는 그림 3의 결과에 대해서 덕트가 발생한 날짜의 횟수를 표기한 것으로 지상 지역의 결과를 나타내는 그림 4(a)의 경우, 봄과 여름에 비교적 많은 덕트가 발생하며, 가을에는 덕트 발생이 줄고 겨울에는 관측이 되지 않는다. 또한 모든 덕트는 접지성 덕트(surface duct)가 아닌 이지성 덕트(elevated duct)로 나타났다. 반면 해안의 결과를 보여주는 그림 4(b)는 지상의 결과 대비 뚜렷하게



(a) 2022년 오전 9시 내륙 지역(광주)
(a) Inland area (Gwangju) at 9:00 AM in 2022



(b) 2022년 오전 9시 해안 지역(흑산도)
(b) Coastal area (Heuksan island) at 9:00 AM in 2022

그림 4. 오전 9시 내륙 및 해안 지역 덕트 발생 횟수
Fig. 4. Number of duct for inland and coastal areas at 9:00 AM.

덕트 발생 횟수가 늘어났음을 알 수 있으며, 여름과 가을에 덕트 횟수가 높게 관측되었다. 대부분의 덕트는 이지성 덕트이지만 접지성 덕트 또한 일부 관측된다. 이는 해안 지역이 내륙 지역 대비 더 강한 대기 굴절률이 일반적으로 발생함을 의미한다.

III. 데이터 분석

3-1 지역별 시간에 따른 덕트 발생 경향성

그림 5는 지역별 시간에 따른 덕트 발생 경향성 분석 결과를 나타낸다. 지역에 따른 차이가 있으나, 오산, 포항 지역을 제외한 나머지 지역에서는 오후 9시에 더 많은 덕트가 관측되었으며, 오산과 포항은 오전 9시에 더 많은 덕트가 관측되었다. 또한 해안 지역인 백령도, 흑산도, 제주도에는 덕트가 매우 높게 관측되는 반면 그 외의 지역인 북강릉, 오산, 포항, 광주에는 비교적 덕트 발생 횟수가 적게 나타난다.

3-2 지역별 연도에 따른 덕트 발생 경향성

그림 6은 내륙 지역 및 해안 지역에서의 덕트 발생 횟수를 2015년부터 2023년까지 연도별로 정리한 결과를 보여준다. 그림 6(a)에서 보듯이 내륙 지역에서는, 해에 따

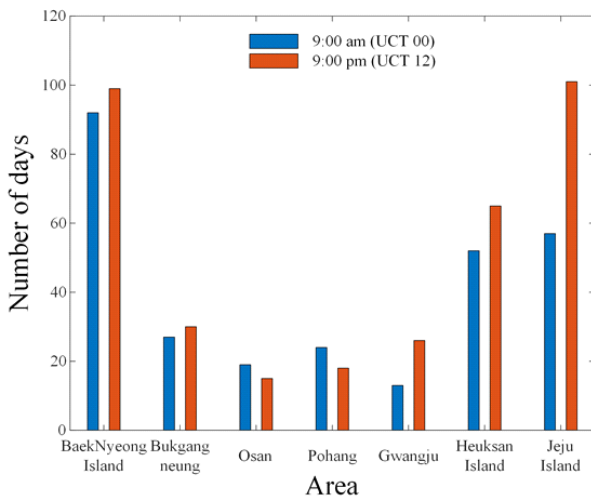
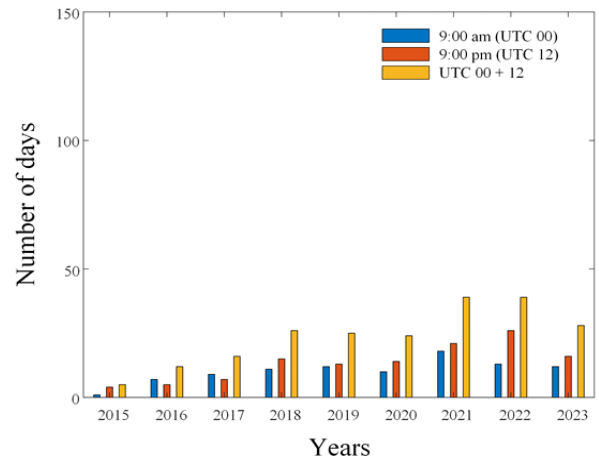
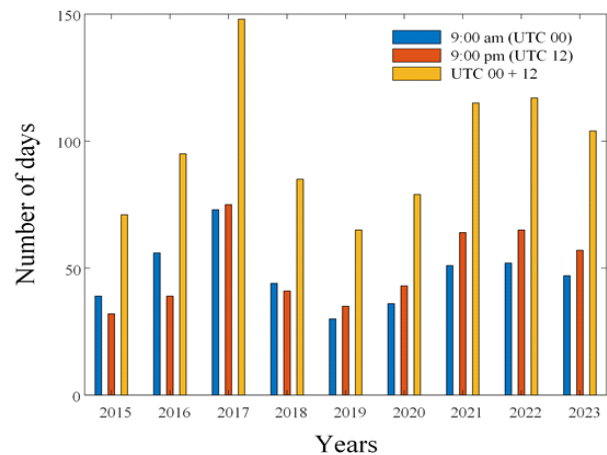


그림 5. 지역 및 시간에 따른 덕트 발생 경향성
Fig. 5. Duct occurrence tendency according to areas and time.



(a) 내륙 지역(광주)
(a) Inland area (Gwangju)



(b) 해안 지역(흑산도)
(b) Coastal area (Heuksan island)

그림 6. 연도별 내륙 및 해안 지역 평균 덕트 발생 경향성
Fig. 6. Average duct occurrence tendency for inland and coastal areas by year.

라 차이는 있으나 전반적으로 오후 9시에 덕트 발생이 더 많이 관측되며, 전체 덕트 발생 횟수는 39회 이하로 나타난다. 반면 그림 6(b)으로 나타낸 해안 지역에서의 결과를 살펴보면 덕트 발생 횟수가 최대 148회까지 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 해안 지역도 마찬가지로 오후가 오전보다 더 많은 덕트를 발생시키는 것으로 나타났다.

표 3 및 표 4는 각각 내륙 지역과 해안 지역에서 계절, 시간별 덕트 발생 확률을 나타내고 있다. 덕트 발생 확률

표 3. 내륙 지역의 계절, 시간별 덕트 발생 확률

Table 3. Probability of duct occurrence by season and time for inland area (unit: %).

Time	Spring	Summer	Fall	Winter
Morning	1.9	5.4	7.4	0.1
Afternoon	3.5	6.6	7.6	0.5

표 4. 해안 지역의 계절, 시간별 덕트 발생 확률

Table 4. Probability of duct occurrence by season and time in the coastal area (unit: %).

Time	Spring	Summer	Fall	Winter
Morning	19.8	15.7	23.4	10.7
Afternoon	22.4	19.3	24.6	9.4

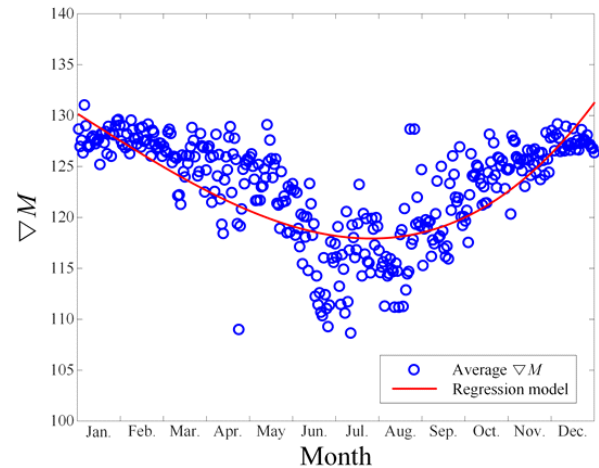
은 9년 동안 각 지역(내륙, 해안), 계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 시간(오전, 오후)에 덕트가 발생한 날의 횟수를 분석하고, 각 조건별로 연 단위 평균값을 구한 후 365일로 나누어 계산한다. 이때 내륙 지역은 북강릉, 오산, 포항, 광주를 포함하고, 해안 지역은 백령도, 흑산도, 제주도를 포함한다.

표 3에서 내륙 지역의 계절, 시간별 덕트 발생 확률을 확인한 결과 가을에 덕트가 발생할 확률이 높게 나타나지만 가장 높은 값이 7.6 %로 내륙 지역에서는 덕트가 발생할 확률이 낮은 것으로 나타났다. 내륙 지역 겨울의 경우 0.1 % (오전), 0.5 % (오후)로 매우 낮게 나타나는 것을 확인했다.

표 4에서 해안 지역의 계절, 시간별 덕트 발생 확률을 확인한 결과 내륙 지역과 유사하게 가을에 덕트가 발생할 확률이 높게 나타나고 가장 높은 값은 24.6 %로 4일 중 하루의 빈도로 덕트가 발생한다는 것을 확인했다.

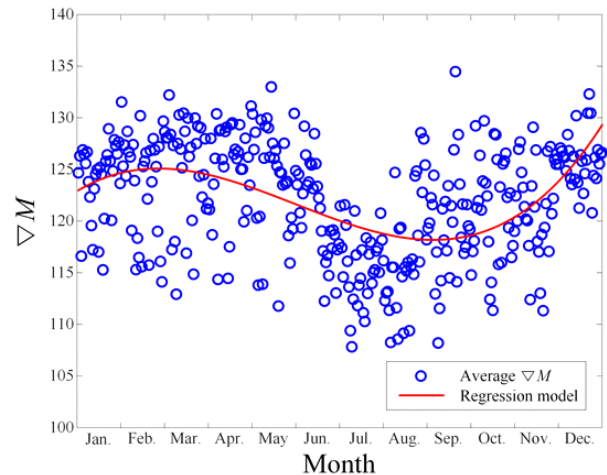
표 3과 표 4의 결과를 비교 및 분석했을 때, 계절에 상관없이 해안 지역에서 덕트가 발생할 확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 내륙, 해안 지역 모두 가을에 가장 높은 확률로 덕트가 발생하고, 겨울에 가장 낮은 확률로 발생하는 것을 확인할 수 있고, 그 중에서도 오후에 덕트 발생 확률이 높은 것을 확인했다.

그림 7은 9년(2015~2023)간 내륙 및 해안 지역 대기 굴절률 변화율(∇M)의 평균값 분포를 나타낸다. 내륙 지



(a) 내륙 지역

(a) Inland area



(b) 해안 지역

(b) Coastal area

그림 7. 내륙 및 해안 지역 날짜별 ∇M 평균값 분포Fig. 7. Distribution of average ∇M by date in inland and coastal areas.

역에서 지상으로부터 고도 5,000 m까지 ∇M 의 평균값은 그림 7(a)의 파란색 원과 같으며, 이 분포를 통해 날짜에 따른 경향을 확인할 수 있다. 경향성을 더 명확하게 확인하기 위해서 붉은색 실선과 같은 2차 함수 형태의 회귀함수를 획득하였다. 그림 7(b)는 위와 동일한 방식을 통해 해안 지역의 ∇M 평균값을 나타냈으며, 3차 함수 형태의 회귀함수를 활용하여 경향성을 확인할 수 있었다. 이를 통해 각 지역에서 날짜별 대표 ∇M 을 도출하였고, 이를

활용하여 레이더 시스템 운용 시 탐지 오차를 최소화하기 위한 대표 보정 각도를 계산하였다. 그림 8(a)는 내륙 지역에서 날짜별 대표 보정 각도를 나타내며, 여름에는 $0.3^\circ \sim 0.35^\circ$ 정도의 보정 각도가 필요하지만 겨울에는 보정 각도가 $0.1^\circ \sim 0.15^\circ$ 수준이 필요한 것을 확인했다. 그림 8(b)는 해안 지역에서 날짜별 대표 보정 각도를 나타내며, 여름에는 내륙 지역과 유사하게 $0.3^\circ \sim 0.35^\circ$ 정도의 보정 각도가 필요한 것을 확인했지만, 겨울에는 보정 각

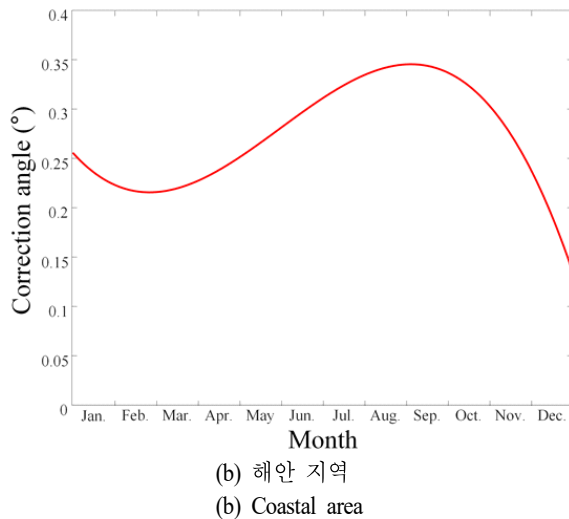
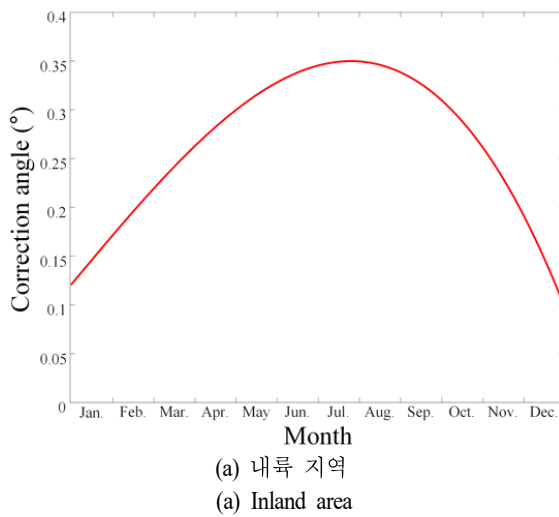


그림 8. 내륙 및 해안 지역 날짜별 대표 보정 각도
Fig. 8. Representative correction angles by date for inland and coastal areas.

도가 $0.15^\circ \sim 0.25^\circ$ 수준으로 내륙 지역보다 $0.05^\circ \sim 0.1^\circ$ 정도 높은 보정 각도가 요구되는 것을 확인했다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내 고층 기상 측정 데이터를 기반으로 계절 및 지역별 덕트의 경향성을 분석하였다. 기상 데이터는 국내 고층 기상대 7곳(백령도, 흑산도, 제주도, 오산, 광주, 북강릉, 포항)에서 과거 9년(2015~2023)간 수집한 기상자료를 활용하였다. 모든 날짜에 대한 대기 굴절률을 M -unit의 형태로 계산하고, 이때 강한 탐지 오차를 발생시키는 덕트 상태를 따로 분류하여 계절별, 지역별로 조사하고, 덕트 발생 확률을 계산했다. 계산 결과 지역적 측면에서 보았을 때 계절에 상관없이 해안 지역에서 덕트가 발생할 확률이 높은 것을 확인할 수 있었고, 계절적 측면에서 보았을 때 내륙, 해안 지역 모두 가을에 가장 높은 확률로 덕트가 발생하고, 겨울에 가장 낮은 확률로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 시간적 측면에서는 오후에 덕트 발생 확률이 높은 것을 확인했다. 이러한 결과를 기반으로 레이더 시스템 운용 시 탐지 오차를 최소화하기 위해 지역 및 날짜별 ∇M 평균값 및 대표 보정 각도를 제안했다.

References

- [1] J. H. Yoon, Y. Kim, "Clutter rejection for FM ranging airborne radar," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 6, pp. 455-460, Nov. 2023.
- [2] J. Cho, J. Park, H. Jin, J. Bae, and K. Y. Jung, "Efficient FDTD simulation for the EM analysis of Faraday rotation in the ionosphere," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 6, pp. 530-532, Nov. 2023.
- [3] P. Shang, Y. Lu, and S. Kamae, "Detecting long-range correlations of traffic time series with multifractal detrended fluctuation analysis," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 36, no. 1, pp. 82-90, Apr. 2008.
- [4] I. Bartoli, F. L. di Scalea, M. Fateh, and E. Viola, "Modeling guided wave propagation with application to

- the long-range defect detection in railroad tracks," *NDT & E International*, vol. 38, no. 5, pp. 325-334, Jul. 2005.
- [5] T. H. Lim, H. Choo, "Prediction of target detection probability based on air-to-air long-range scenarios in anomalous atmospheric environments," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 19, p. 3943, Aug. 2021.
- [6] J. W. Kantelhardt, E. Koscielny-Bunde, H. H. A. Rego, S. Havlin, and A. Bunde, "Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis," *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 295, no. 3-4, pp. 441-454, Jun. 2001.
- [7] S. Wang, T. H. Lim, and H. Choo, "Path loss analysis considering atmospheric refractivity and precipitation for air-to-ground radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 1968-1972, Oct. 2021.
- [8] Y. Zeng, U. Blahak, M. Neuper, and D. Jerger, "Radar beam tracing methods based on atmospheric refractive index," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 2650-2670, Dec. 2014.
- [9] H. Si-Xun, Z. Xiao-Feng, and S. Zheng, "Refractivity estimation from radar sea clutter," *Chinese Physics B*, vol. 18, no. 11, pp. 5084-5090, Nov. 2009.
- [10] C. Kim, Y. B. Park, "Prediction of electromagnetic wave propagation in space environments based on geometrical optics," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 3, pp. 165-167, Jul. 2017.
- [11] T. Jin, J. Cho, D. Jang, and H. Choo, "Prediction of atmospheric duct conditions from a clutter power spectrum using deep learning," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 4, p. 674, Feb. 2024.
- [12] I. Durre, R. S. Vose, and D. B. Wuertz, "Overview of the integrated global radiosonde archive," *Journal of Climate*, vol. 19, no. 1, pp. 53-68, Jan. 2006.
- [13] J. K. Luers, R. E. Eskridge, "Use of radiosonde temperature data in climate studies," *Journal of Climate*, vol. 11, no. 5, pp. 1002-1019, May 1998.
- [14] M. H. Park, J. Kim, W. J. Jeon, S. W. Kwon, K. W. Lee, and S. H. Kim, "Analysis of atmospheric conditions associated with radar performance," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 27, no. 6, pp. 700-708, Jun. 2023.
- [15] S. Wang, T. H. Lim, Y. J. Chong, M. Go, Y. B. Park, and H. Choo, "Analysis of abnormal path loss in Jeju coastal area using duct map," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 3, pp. 223-228, Mar. 2019.
- [16] M. C. Kang, S. Kwon, J. Lee, K. Lee, W. Sun, and G. Byun, et al., "Analysis of atmospheric conditions using long-range surveillance radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 2, pp. 120-128, Feb. 2017.
- [17] *The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data*, Recommendation ITU-R P.453-14, Aug. 2019.
- [18] E. Dinc, O. B. Akan, "Channel model for the surface ducts: Large-scale path-loss, delay spread, and AOA," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2728-2738, Apr. 2015.

임 창 현 [홍익대학교/통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8973-4398>



2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2021년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 통합과정

[주 관심분야] 전개형 반사판 안테나, 5G 안테나, 무선 전력전송, UWB 안테나 설계

김 남 문 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0581-122X>



2011년 2월: 광운대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

2016년 2월: 광운대학교 전자공학과 졸업 (공학박사)

2016년 3월~현재: 한화시스템 지상레이 다체계1팀 전문연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계, 시스템

알고리즘, 실내 측위

장 도 영 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5629-8294>



2015년~2018년: 모아소프트 RF/EMC 사업부 연구원

2018년 2월: 동양미래대학교 정보통신학과 (공학사)

2020년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2023년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과

(공학박사)

2024년 5월~현재: 한화시스템 지상레이다체계1팀 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 설계, 배열안테나 설계, 전파환경 분석

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나