



Received: 2026/07/28
Revised: 2026/08/10
Accepted: 2026/08/29
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Myunghoon Park

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5179-7267

Fax: +82-31-5179-7086

E-mail: pmh604god@gmail.com

Abstract

본 연구에서는 기상청 라디오존데 관측자료를 이용하여 함정 탑재 레이더의 저고도 전파환경을 분석하고, 대기굴절 특성이 기하학적 가시선(LOS)에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 기존의 0 km - 1 km 평균층 대신 레이더 운용환경을 고려한 20 m - 200 m 인접층을 분석 대상으로 설정하여 굴절도 기울기, k-factor 및 LOS 변화를 산출하였다. 분석 결과, 정상굴절이 가장 높은 발생 비율을 보였으며, 여름철에는 초굴절 및 덕트 발생 증가와 함께 k-factor 증가 및 LOS 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 또한 동일한 관측자료라도 분석 고도층에 따라 굴절환경과 LOS 변화 특성이 서로 다르게 나타나 기존 0 km - 1 km 대표층만으로는 저고도 레이더 운용환경을 충분히 반영하기 어려움을 확인하였다.

The aim of this study was to quantitatively investigate the effects of atmospheric refractivity on the low-altitude propagation environment of shipborne radars using Korea Meteorological Administration radiosonde observations. Instead of the conventional 0-1 km boundary layer, a radar-adjacent layer of 20-200 m was analyzed to estimate the refractivity gradient, effective Earth radius factor (k-factor), and geometric line-of-sight (LOS) variation. The results show that normal refraction was the dominant propagation condition, and summer exhibited increased super-refraction and ducting, accompanied by higher k-factors and extended LOS distances. Furthermore, noticeable differences were observed between the conventional boundary-layer analysis and the radar-adjacent layer analysis, indicating that the conventional approach does not fully represent the propagation environment experienced by low-altitude shipborne radars.

Keywords

대기 굴절도(Atmospheric Refractivity),
라디오존데(Radiosonde),
전파 전파(Radio Wave Propagation),
가시선(Line-of-Sight),
대기 덕트(Atmospheric Ducting)

라디오존데 관측자료 기반 저고도 대기굴절 특성과 가시선 변화 분석

Analysis of Low-Altitude Atmospheric Refractivity Characteristics and Line-of-Sight Variations Based on Radiosonde Observations

박명훈*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Jinyong Go, Jaedeok Jang

Chief research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

1. 서론

최근 저고도 표적의 위협이 증가함에 따라 함정 탑재 레이더의 저고도 탐지 성능에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 해면 근접 비행체, 무인기 및 순항미사일과 같은 저고도 표적은 지구 곡률과 대기 굴절 특성의 영향을 동시에 받기 때문에, 동일한 레이더 성능이라 하더라도 운용 환경에 따라 실제 탐지 가능 거리가 크게 변화할 수 있다. 따라서 저고도 표적 탐지 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 레이더 자체의 성능뿐만 아니라 전파가 전파되는 대기환경을 함께 고려할 필요가 있다[1,2].

대기 굴절 특성은 일반적으로 전파 굴절도(refractivity, N)와 수정 굴절도(modified refractivity, M)를 이용하여 표현되며, 특히 수정 굴절도의 고도 기울기(dM/dh)는 정상굴절, 초굴절 및 덕트 현상을 결정하는 대표적인 지표로 알려져 있다[3]. 이러한 굴절 특성은 계절, 기상 조건 및 해양 환경에 따라 지속적으로 변화하며, 레이더 전파의 굴절 정도와 가시선(line-of-sight, LOS)에 직접적인 영향을 미친다. 특히 해상 환경에서는 수증기와 기온의 수직 분포 변화가 크게 나타나므로 내륙보다 초굴절 및 덕트 현상이 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있다[4,5].

기존 연구에서는 주로 국제표준대기 또는 고정된 실효지구반경 계수($k=4/3$)를 이용하여 레이더 전파환경을 분석하거나, 라디오존데 관측자료를 이용하여 대기 굴절 특성을 통계적으로 분석하는

연구가 수행되었다[6-8]. 그러나 대부분의 연구는 대기 경계층 전체를 대표하는 평균 굴절 특성에 초점을 두고 있어 실제 레이더 안테나가 위치한 저고도 영역의 국지적인 굴절 특성이 레이더 가시선 변화에 미치는 영향을 직접적으로 분석한 사례는 제한적이다. 특히 함정 탐재 레이더는 해수면으로부터 수십 미터 높이에 설치되므로, 레이더 인접 저고도층의 굴절 특성이 실제 운용 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 기상청 라디오존데 관측자료를 이용하여 저고도 대기 굴절 특성을 분석하고, 그 결과가 레이더 가시선 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 서해 도서지역인 덕적북리에서 관측된 2023년부터 2025년까지의 라디오존데 자료를 이용하였으며, 레이더 운용 환경을 고려하여 안테나 높이 인접층인 20 m – 200 m 구간의 굴절도 기울기를 산출하였다. 또한 기존의 0 km – 1 km 대표 굴절도 분석 결과와 비교하여 저고도층 분석의 차이를 확인하고, 월별·계절별 대기 굴절 특성과 레이더 가시선 변화의 상관관계를 분석하였다.

본 연구의 기여는 다음과 같다. 첫째, 기상청 라디오존데 실측자료를 이용하여 해상 인접 저고도 대기의 굴절 특성을 계절별 및 월별로 정량화하였다. 둘째, 기존의 0 km – 1 km 대표 굴절도 분석과 레이더 인접 저고도층 분석 결과를 비교하여 실제 레이더 운용 환경을 보다 잘 반영할 수 있는 분석 방법을 제시하였다. 셋째, 저고도 대기 굴절 특성의 계절적 변화가 레이더 가시선 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써, 함정 탐재 레이더의 운용 성능 평가를 위한 기초 자료를 제시하였다.

2. 저고도 대기굴절 및 가시선 분석 모델

2.1 라디오존데 기반 저고도 대기굴절도 계산

라디오존데는 고도에 따른 기압, 기온 및 이슬점온도를 직접 관측하여 대기의 수직 구조를 제공한다. 본 연구에서는 기상청 라디오존데 관측자료를 이용하여 수증기압과 굴절도를 계산하고, 이를 기반으로 수정 굴절도(modified refractivity)를 산출하였다.

수증기압은 이슬점온도를 이용하여 계산하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$e = 6.112 \exp \left(\frac{17.67 T_d}{T_d + 243.5} \right) \quad (1)$$

여기서 e 는 수증기압(hPa), T_d 는 이슬점온도(°C)이다. 전파 굴절도 N 은 다음 식으로 계산된다.

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

여기서 P 는 기압(hPa), T 는 절대온도(K), e 는 수증기압(hPa)이다. 지구 곡률의 영향을 고려하기 위하여 수정 굴절도 M 은 다음과 같이 계산하였다.

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

여기서 h 는 고도(m)이다.

수정 굴절도의 수직 기울기(dM/dh)는 대기 굴절 특성을 결정하는 대표적인 지표이며, 일반적으로 Table 1과 같이 분류된다.

Table 1. Classification criteria of atmospheric refractivity conditions based on the modified refractivity gradient

Atmospheric Condition	dM/dh (M-unit/km)
Ducting	< 0
Super-refraction	$0 \sim 79$
Normal	$79 \sim 157$
Sub-refraction	> 157

기존 연구에서는 일반적으로 0 km – 1 km 또는 0 km – 3 km 대기층의 평균 굴절 특성을 이용하여 전파환경을 분석하였다. 그러나 함정 탐재 레이더는 해수면으로부터 수십 미터 높이에 설치되므로 실제 전파는 안테나 인접 저고도층의 영향을 가장 먼저 받는다. 따라서 본 연구에서는 기존의 0 km – 1 km 대표 굴절도와 함께 레이더 안테나 높이를 고려한 20 m – 200 m 저고도층의 수정 굴절도 기울기를 추가적으로 분석하였다.

2.2 저고도 대기굴절에 따른 레이더 가시선 계산

대기 굴절 특성은 실효지구반경 계수(k -factor)를

통해 레이더 전파 경로에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 수정 굴절도 기울기로부터 전파 굴절도를 계산하고, 이를 이용하여 실효지구반경 계수를 다음과 같이 산출하였다.

$$k = \frac{1}{1 + \frac{dN/dh}{157}} \quad (4)$$

여기서 dN/dh 는 전파 굴절도의 수직 기울기(N-unit/km)이다. 실효지구반경 계수를 적용한 레이더 가시선(line-of-sight, LOS)은 다음 식으로 계산하였다.

$$LOS = \sqrt{2kR_e h_r} + \sqrt{2kR_e h_t} \quad (5)$$

여기서 R_e 는 지구 반경, h_r 은 레이더 안테나 높이, h_t 는 표적 고도이다.

일반적으로 레이더 성능 평가는 표준대기 조건인 $k=4/3$ 을 적용하지만, 실제 대기환경에서는 기상 조건에 따라 k -factor가 지속적으로 변화한다. 이에 따라 동일한 레이더 성능이라도 기하학적 가시선이 증가하거나 감소할 수 있다. 본 연구에서는 라디오존데 실측자료로부터 계산된 k -factor를 이용하여 표준대기 대비 레이더 가시선 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한 기존의 0 km – 1 km 대표 굴절도 기반 결과와 레이더 인접 저고도층 기반 결과를 비교하여, 실제 함정 탑재 레이더 운용환경을 보다 적절하게 반영할 수 있는 분석 방법을 제시하였다.

3. 분석 환경

3.1 분석 자료

본 연구에서는 기상청 기상자료개방포털에서 제공하는 라디오존데 관측자료를 이용하였다. 분석 대상은 서해 도서지역인 덕적북리(47230) 관측소이며, 2023년부터 2025년까지 획득된 자료를 사용하였다. 연도별 자료의 일관성을 확보하기 위하여 모든 연도에서 공통적으로 제공되는 00 UTC와 12 UTC 관측자료만을 분석 대상으로 선정하였다.

라디오존데 자료는 관측 시각별로 기압, 기온 및 이슬점온도를 포함하고 있으며, 각 관측은 고도 증가에

따라 연속적으로 측정된 수직 프로파일로 구성된다. 본 연구에서는 각 관측 프로파일에 대하여 전파 굴절도(N), 수정 굴절도(M) 및 수정 굴절도 기울기(dM/dh)를 계산하였으며, 이후 대기 굴절 특성 및 레이더 가시선 변화를 분석하였다. 또한 신뢰성 있는 통계 결과를 확보하기 위하여 저고도 분석 구간에 충분한 관측점이 존재하지 않는 프로파일은 분석 대상에서 제외하였다.

3.2 분석 조건

본 연구에서는 기존의 대기경계층 평균 특성과 함정 탑재 레이더 운용환경을 동시에 분석하기 위하여 두 가지 대표 분석 구간을 적용하였다.

첫 번째는 기존 연구에서 일반적으로 사용되는 0 km – 1 km 대표층으로, 수정 굴절도의 선형 회귀를 통해 대표 수정 굴절도 기울기를 계산하였다. 해당 결과는 지역의 평균적인 대기 굴절 특성을 분석하기 위한 기준으로 사용하였다.

두 번째는 함정 탑재 레이더의 실제 운용환경을 고려한 20 m – 200 m 저고도층이다. 본 연구에서는 레이더 안테나 높이를 20 m로 가정하였으며, 저고도층의 수정 굴절도 기울기를 계산하기 위하여 20 m와 200 m 위치의 수정 굴절도를 선형 보간하여 사용하였다. 이를 통해 레이더 전파가 방사 직후 통과하는 저고도 대기의 영향을 보다 직접적으로 반영하였다.

계산된 수정 굴절도 기울기로부터 전파 굴절도 기울기와 실효지구반경 계수(k -factor)를 산출하였으며, 이를 이용하여 표준대기 대비 레이더 가시선(line-of-sight, LOS)의 변화를 계산하였다. 또한 월별, 계절별 및 연도별 통계를 수행하여 저고도 대기 굴절 특성과 레이더 가시선 변화의 장기적인 경향을 분석하였다.

4. 분석 결과

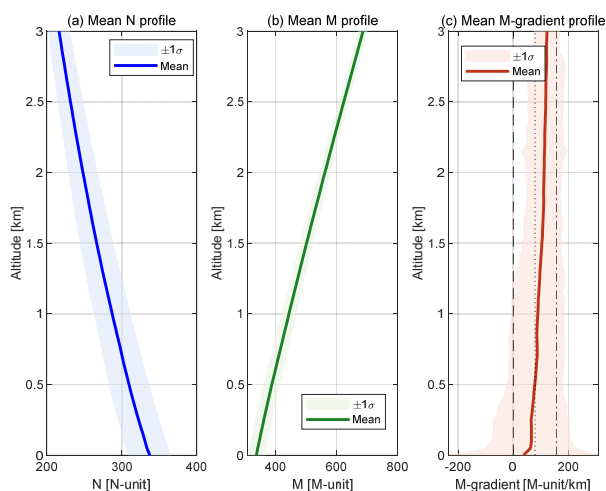
덕적북리 라디오존데 자료를 동일 조건으로 재계산한 결과, 2023년부터 2025년까지 00 UTC와 12 UTC에 확보된 2,120개 관측 시각 중 20 m – 200 m 구간을 유효하게 포함하는 2,103개 프로파일이 최종 분석에 사용되었다. 분석 결과는 대기경계층 전체의 평균적인 굴절 특성과 함정 탑재 레이더가 직접 영향을 받

Table 2. Analysis conditions used in this study

Parameter	Value	Unit
Observation station	Deokjeokbuk-ri	–
Analysis period	2023–2025	year
Observation time	00, 12	UTC
Analysis altitude (general)	0–1	km
Analysis altitude (shipborne radar)	20–200	m
Maximum profile altitude	30	km
Maximum analysis altitude	3	km
Radar height	20	m
Target height	100	m
Standard effective Earth radius factor	$k=4/3$	–

는 안테나 인접 저고도층의 굴절 특성이 반드시 일치하지 않음을 보여준다.

Fig. 1은 0 km – 3 km 구간에서 산출한 전파 굴절도 N , 수정 굴절도 M 및 수정 굴절도 기울기의 평균 수직 분포와 $\pm 1\sigma$ 범위를 나타낸다. N 은 고도 증가에 따라 지속적으로 감소하는 반면, M 은 지구 곡률 보정항이 포함되므로 전체적으로 증가하는 형태를 보인다. 그러나 레이더 전파경로를 결정하는 직접적인 지표는 각 값의 절대 크기보다 M -gradient이며, 평균 프로파일에서도 저고도 구간의 변동폭이 상층보다 상대적으로 크게 나타난다. 이는 해수면 부근의 기온과 수증기 수직구조가 짧은 시간에도 변화하면서 저

**Fig. 1.** Mean vertical profiles of refractivity, modified refractivity, and modified refractivity gradient**Table 3.** Overall statistical summary of low-altitude atmospheric refractivity and LOS variation

Parameter	Value
Number of valid profiles	2103
Mean M-gradient (M-unit/km)	100.0744269
Standard deviation of M-gradient (M-unit/km)	39.48238388
Mean k-factor	1.687689288
Standard deviation of k-factor	0.961596944
Mean LOS change (%)	9.861145781
Standard deviation of LOS change (%)	24.25886241
LOS increase occurrence (%)	55.92203898
LOS decrease occurrence (%)	44.07796102
Duct occurrence (%)	3.328578222
Super-refraction occurrence (%)	16.83309558
Normal-refraction occurrence (%)	78.93485497
Sub-refraction occurrence (%)	0.903471232

고도 굴절환경의 변동성을 증가시키기 때문이다.

특히 평균 프로파일만 보면 대부분의 고도에서 정상굴절 범위가 우세하지만, $\pm 1\sigma$ 범위는 저고도에서 초굴절 및 부분적인 덕트 조건까지 포함한다. 따라서 장기간 평균 프로파일만으로 실제 운용 시점의 전파 환경을 대표하기는 어렵고, 함정 탐재 레이더가 위치하는 저고도층을 별도로 구분하여 시간적 변화를 분석할 필요가 있다.

Table 3에 나타낸 20 m – 200 m 구간의 전체 평균 M -gradient는 약 100.07 M-unit/km이며, 표준편차는 약 39.48 M-unit/km로 산출되었다. 정상굴절은 전체 프로파일의 약 78.93%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 초굴절은 16.83%, 덕트는 3.33%, 아굴절은 0.90%로 나타났다. 즉, 정상굴절이 지배적인 환경이지만 전체 관측의 약 20%에서는 초굴절 이상의 강한 하향 굴절이 발생하였다.

평균 k -factor는 약 1.69이며, 평균 LOS 변화율은 표준대기 $k=4/3$ 대비 약 +9.86%로 계산되었다. 그러나 LOS 변화율의 중앙값은 약 +1.27%에 불과하며, 증가 사례와 감소 사례의 비율도 각각 약 55.92%와 44.08%로 나타났다. 평균과 중앙값 사이의 차이는 일부 강한 초굴절 및 덕트 사례에서 큰 k -factor와

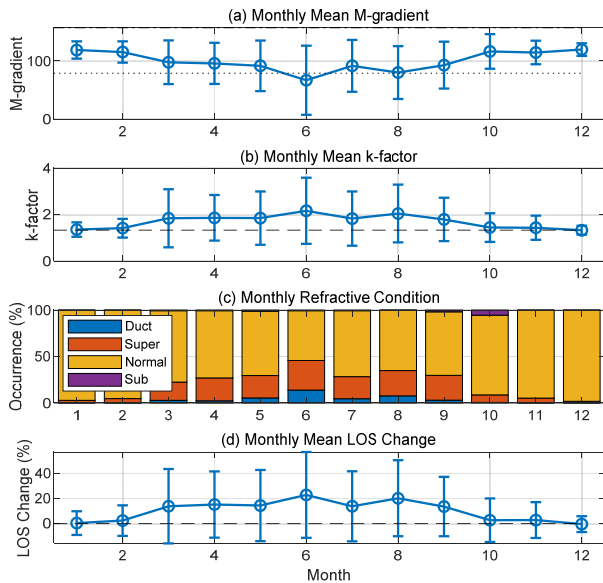


Fig. 2. Monthly variation of low-altitude refractivity characteristics and geometric LOS

LOS 증가가 발생하여 산술평균을 상승시켰기 때문이다. 따라서 전체 평균값만으로는 일반적인 운용조건을 과대평가할 수 있으며, LOS 변화의 방향과 발생 빈도를 함께 고려해야 한다.

월별 결과에서는 Fig. 2와 같이 저고도 굴절환경의 뚜렷한 계절 전환이 나타난다. 1월과 2월에는 평균 M-gradient가 각각 약 118.69 및 115.37 M-unit/km로 비교적 높고, 정상굴절 비율도 각각 97.19%와 95.21%에 달한다. 이 시기에는 평균 LOS 변화가 크지 않으며 중앙값 기준으로는 표준대기보다 감소하는 경향을 보인다.

봄철로 진입하면서 M-gradient가 점차 감소하고 k-factor가 증가한다. 3~5월의 평균 M-gradient는 약 91.73 M-unit/km – 97.76 M-unit/km이며, 초굴절과 덕트의 비율도 함께 증가한다. 이러한 변화는 저고도에서 굴절도 감소율이 커지고 전파경로의 하향 굴절이 강화되었음을 의미하며, 평균 LOS 변화 역시 약 +13.9%에서 +15.2% 수준으로 증가한다.

가장 강한 변화는 6월에 나타난다. 6월 평균 M-gradient는 약 66.89 M-unit/km로 연중 가장 낮고, 평균 k-factor는 약 2.17로 가장 높다. 덕트 발생률은 약 13.86%, 초굴절 발생률은 약 31.93%이며, 평균 LOS 변화율은 약 +22.92%로 나타났다. 8월에도 평균 M-gradient 약 80.15 M-unit/km, 덕트 발생률 약 7.65%, 평균 LOS 변화율 약 +20.23%로 강한 초굴절 환경이 유지된다.

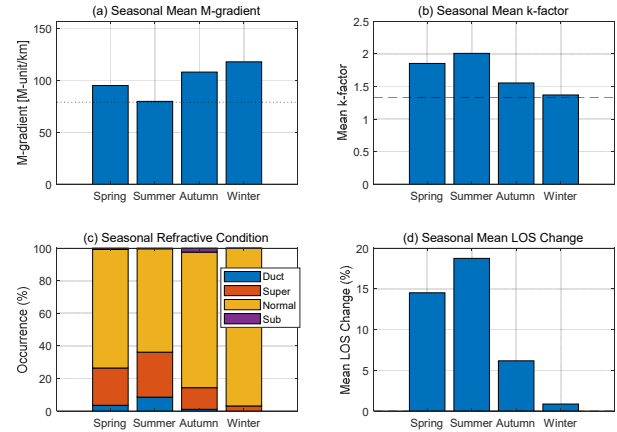


Fig. 3. Seasonal variation of low-altitude refractivity characteristics and geometric LOS

다만 여름철 결과를 단순히 탐지거리 증가로 해석해서는 안 된다. 본 연구의 LOS 변화는 실효지구반경 모델에 따른 기하학적 레이다 수평선의 변화이며, 실제 탐지거리는 안테나 특성, 해면 클러터, 다중경로 및 표적 레이다 반사단면적 등의 영향을 함께 받는다. 또한 강한 덕트가 형성되면 특정 고도에서는 전파가 포획되는 반면 다른 고도에서는 음영구역이 발생할 수 있으므로, LOS 증가가 모든 표적에 대한 탐지 성능 향상을 의미하지는 않는다.

9월 이후에는 M-gradient가 다시 증가하면서 k-factor와 LOS 변화가 감소한다. 특히 10월에는 아굴절 비율이 약 5.43%로 다른 월보다 상대적으로 높고, 11월과 12월에는 정상굴절이 각각 약 94.86%와 98.17%를 차지한다. 12월의 평균 LOS 변화율은 약

Table 4. Seasonal statistical summary of the radar-adjacent layer

Category	Spring	Summer	Autumn	Winter
Mean M-gradient (M-unit/km)	95.0519	79.8263	108.1034	117.8914
Mean k-factor	1.8536	2.0064	1.5527	1.3691
Mean LOS change (%)	14.5189	18.7445	6.1763	0.8709
Duct (%)	3.5315	8.57142	1.1299	0
Super (%)	22.8624	27.6190	13.1826	3.14341
Normal (%)	72.8624	63.4285	83.2391	96.8565
Sub (%)	0.7434	0.3809	2.44821	0

-0.34%로 나타나, 늦가을 이후에는 표준대기보다 기하학적 가시선이 감소하는 조건이 다시 우세해짐을 알 수 있다.

계절별 결과는 월별 변화에서 나타난 전환 특성을 더욱 명확하게 보여준다. 봄철 평균 M-gradient는 약 95.05 M-unit/km이며, 평균 k-factor와 평균 LOS 변화율은 각각 약 1.85와 +14.52%이다. 초굴절과 덕트 비율은 각각 약 22.86%와 3.53%로, 겨울철보다 굴절환경의 변동성이 크게 증가한다.

여름철에는 평균 M-gradient가 약 79.83 M-unit/km까지 감소하고, 평균 k-factor는 약 2.01로 증가한다. 정상굴절 비율은 약 63.43%로 감소한 반면, 초굴절은 27.62%, 덕트는 8.57%까지 증가한다. 평균 LOS 변화율은 약 +18.74%이며, LOS 증가 사례도 약 77.01%를 차지한다. 이는 여름철 해상 인접 저고도층에서 강한 하향 굴절 조건이 빈번하게 형성된다는 것을 의미한다.

가을철에는 평균 M-gradient가 약 108.10 M-unit/km로 증가하면서 정상굴절 비율이 약 83.24%로 회복된다. 평균 LOS 변화율은 약 +6.18%로 낮아지고, LOS 증가와 감소 사례의 비율도 각각 52.90%와 47.10%로 거의 균형을 이룬다. 즉, 가을은 여름철 초굴절 환경에서 겨울철 약굴절 환경으로 전환되는 과도기적 특성을 보인다.

겨울철 평균 M-gradient는 약 117.89 M-unit/km로 가장 높고, 정상굴절 비율은 약 96.86%에 달한다. 평균 LOS 변화율은 약 +0.87%로 표준대기와 유사하지만, 중앙값은 약 -2.01%이며 LOS 감소 사례가 약 69.55%를 차지한다. 여기서 중요한 점은 정상굴절로 분류된 경우에도 반드시 표준 $k=4/3$ 과 동일한 전파 경로를 갖는 것은 아니라는 것이다. M-gradient가 정상굴절 분류 범위 내에 있더라도 표준대기 기준보다 큰 경우에는 k-factor가 $4/3$ 보다 작아지고 LOS가 감소할 수 있다. 따라서 정상·초굴절·덕트·아굴절의 범주형 분류만으로 레이다 가시선 변화를 판단하는 것은 충분하지 않다.

일별 결과에서는 월평균과 계절평균으로는 드러나지 않는 큰 단기 변동이 나타난다. 동일한 계절과 월에서도 M-gradient가 정상굴절과 초굴절 범위를 반복적으로 이동하며, 이에 따라 k-factor와 LOS 변화율도 급격하게 변한다. 특히 여름철에는 큰 양의 LOS 변화가 빈번하지만, 모든 관측 시점에서 증가하

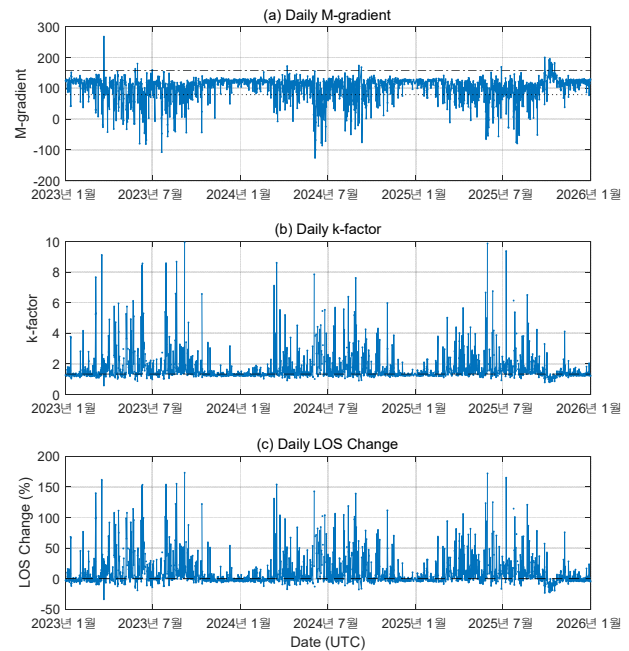


Fig. 4. Daily variation of M-gradient, k-factor, and geometric LOS in the radar-adjacent layer

는 것은 아니며 표준대기보다 감소하는 사례도 지속적으로 존재한다.

이러한 결과는 함정 레이다 운용환경을 월별 또는 계절별 고정 계수로만 설정할 경우 실제 단기 변화를 충분히 반영하지 못할 수 있음을 의미한다. 계절 통계는 전반적인 운용 경향과 위험 시기를 판단하는 데 유용하지만, 특정 시험 또는 작전 시점의 성능을 평가하려면 해당 시점의 저고도 기상 프로파일을 반영할 필요가 있다.

또한 일별 k-factor와 LOS 변화에서 일부 큰 값이 나타나는 것은 강한 초굴절 조건에서 dN/dh 가 임계값에 접근하면서 k-factor가 비선형적으로 증가하기 때문이다. 이 때문에 산술평균은 소수의 강한 사례에 민감하며, 평균값뿐 아니라 중앙값, 표준편차 및 증가·감소 발생률을 함께 제시하는 것이 통계적으로 더 적절하다.

분석 고도층에 따른 비교 결과는 이번 연구의 핵심적인 차이를 보여준다. 기존 0 km – 1 km 대표층의 평균 M-gradient는 약 94.87 M-unit/km이며, 20 m – 200 m 레이다 인접층에서는 약 100.07 M-unit/km로 나타났다. 0 km – 1 km 기준 평균 k-factor는 약 1.83, 평균 LOS 변화율은 약 +14.72%인 반면, 20 m – 200 m 기준에서는 각각 약 1.69와 +9.86%로 감소하였다.

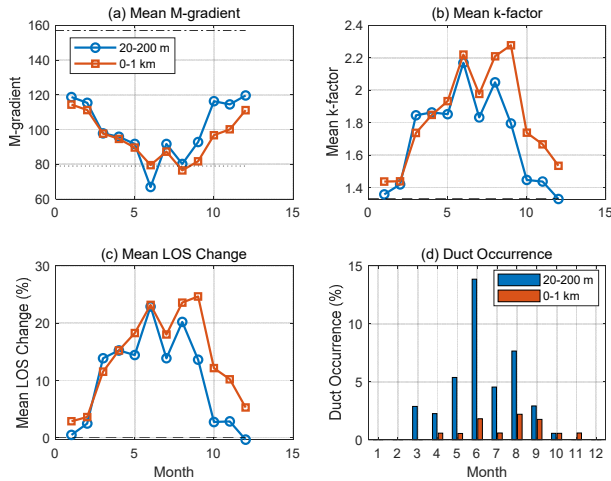


Fig. 5. Comparison between the radar-adjacent layer and the conventional 0 km–1 km layer

0 km – 1 km 분석에서는 초굴절이 약 22.88%, 덕트가 약 0.96%로 산출되었지만, 20 m – 200 m 분석에서는 초굴절이 약 16.83%로 감소하고 덕트는 약 3.33%로 증가하였다. 이는 0 km – 1 km 전체를 하나의 선형 기울기로 평균화하면 상층의 완만한 초굴절 특성이 강조되는 반면, 레이더 인접층에 국한하면 해수면 부근의 강한 국지 기울기와 얇은 덕트가 더 민감하게 반영되기 때문이다.

반대로 아굴절 비율은 0 km – 1 km에서 약 0.19%였으나 20 m – 200 m에서는 약 0.90%로 증가하였다. 이 결과는 저고도층에서 LOS 증가뿐 아니라 감소를 유발하는 국지적인 굴절구조도 0 km – 1 km 평균

Table 5. Comparison of refractivity and LOS statistics between the 0 km–1 km and 20 m–200 m layers

Parameter	Conventional 0 km–1 km	RadarLayer 20 m–200 m
Mean M-gradient (M-unit/km)	94.87364277	100.0744269
Mean k-factor	1.831571457	1.687689288
Mean LOS change (%)	13.66544719	9.861145781
Duct occurrence (%)	0.956022945	3.328578222
Super-refraction occurrence (%)	22.88081581	16.83309558
Normal-refraction occurrence (%)	75.97195666	78.93485497
Sub-refraction occurrence (%)	0.191204589	0.903471232

과정에서 희석될 수 있음을 보여준다. 따라서 함정 탑재 레이더와 같이 안테나가 해수면 가까이에 위치하고 저고도 표적을 대상으로 하는 경우에는 대기경계층 전체 평균보다 안테나 인접층의 굴절도 기울기를 적용하는 것이 실제 운용환경 변화를 더 민감하게 반영한다.

다만 20 m – 200 m 분석이 모든 레이더 전파현상을 완전히 설명하는 것은 아니다. 본 분석은 레이더 방사 직후의 저고도 굴절환경을 대표하는 1차 근사이며, 장거리 전파에서는 경로 전체의 수직·수평 비균질성과 해면 상태가 추가로 작용한다. 그럼에도 동일 자료에서 분석층만 변경했을 때 LOS 감소 사례와 덕트 발생률이 뚜렷하게 달라진다는 점은 레이더 성능 평가에서 분석 고도층 설정이 중요한 변수임을 보여준다.

월-고도 분포에서는 계절 변화가 전체 0 km – 3 km에 균일하게 발생하는 것이 아니라 주로 저고도층에 집중됨을 볼 수 있다. M 자체는 고도 증가에 따라 비교적 연속적으로 변화하지만, M-gradient와 덕트 발생확률은 지표 부근에서 월별 차이가 크게 나타난다. 특히 늦봄부터 여름까지 저고도 M-gradient가 감소하고 덕트 발생확률이 증가하며, 겨울철에는 상대적으로 높은 M-gradient와 낮은 덕트 확률이 유지된다.

이는 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타난 월별·계절별 LOS 변화가 대기층 전체의 일괄적인 변화보다 해수면 인접층의 수직 구조 변화에 의해 주도됨을 뒷받침한다. 또한 고도가 증가할수록 월별 차이와 분산이 점차 감소하는 경향은 레이더 인접 저고도층을 별도로 분석한 본 연구의 설정이 타당함을 보여준다.

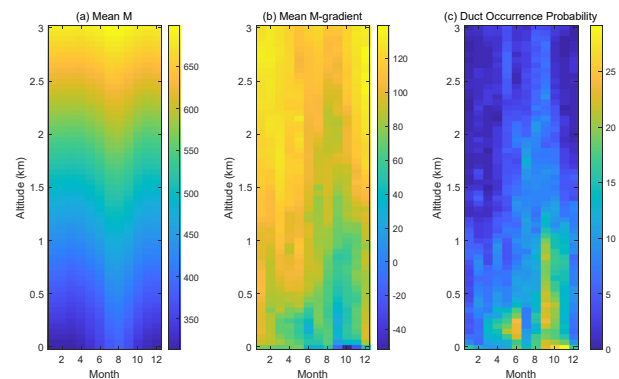


Fig. 6. Monthly and vertical distributions of modified refractivity, modified refractivity gradient, and duct occurrence probability

종합하면, 덕적북리의 저고도 굴절환경은 겨울철의 안정적인 정상굴절 상태에서 봄철을 거쳐 여름철의 강한 초굴절 및 덩트 환경으로 전환된 후 가을철에 다시 정상굴절 중심으로 회복되는 계절적 순환을 보였다. 그러나 이러한 계절평균 내부에서도 일별 변동이 크며, 전체 사례의 약 44%에서는 표준대기보다 LOS가 감소하였다. 특히 기존 0 km – 1 km 대표층은 전반적인 하층대기 특성을 설명하는 데 유용하지만, 함정 탐재 레이더의 실제 저고도 가시선 변화와 얇은 국지 굴절층을 평가하기 위해서는 20 m – 200 m와 같은 안테나 인접층 분석이 병행되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 기상청 라디오존데 관측자료를 이용하여 덕적북리 지역의 저고도 대기굴절 특성을 분석하고, 그 결과가 함정 탐재 레이더의 기하학적 가시선 변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 분석에는 2023년부터 2025년까지의 00 UTC 및 12 UTC 자료를 사용하였으며, 기존의 0 km – 1 km 대표층과 함께 레이더 안테나 인접층인 20 m – 200 m 구간을 별도로 설정하여 굴절도 기울기, k-factor 및 LOS 변화를 비교하였다.

분석 결과, 20 m – 200 m 구간에서는 정상굴절이 전체의 약 79%로 가장 높은 비율을 차지하였으나, 초굴절과 덩트 조건도 각각 약 17%와 3% 수준으로 나타났다. 특히 여름철에는 M-gradient가 감소하고 k-factor가 증가하면서 표준대기 대비 LOS 증가가 우세하였으며, 덩트 발생률도 다른 계절보다 크게 증가하였다. 반면 겨울철에는 정상굴절 비율이 높았음에도 표준 $k=4/3$ 보다 작은 k-factor가 빈번하게 나타나 LOS 감소 사례가 우세하였다. 이는 굴절상태의 범주형 분류만으로는 실제 가시선 증가 또는 감소를 충분히 판단하기 어렵고, M-gradient와 k-factor의 정량값을 함께 고려해야 함을 의미한다.

또한 0 km – 1 km 대표층과 20 m – 200 m 레이더 인접층의 분석 결과는 서로 다른 특성을 보였다. 0 km – 1 km 분석에서는 전체 하층대기의 평균적인 초굴절 경향과 LOS 증가가 상대적으로 강조된 반면, 20 m – 200 m 분석에서는 해수면 인접층의 얇은 덩트와 아굴절 조건이 더욱 민감하게 반영되었다. 이에 따라 함정 탐재 레이더와 같이 저고도에 설치되어 저고도 표

적을 탐지하는 체계의 운용환경을 평가할 경우, 대기 경계층 전체의 평균값만 사용하는 것보다 안테나 인접층의 굴절도 기울기를 별도로 분석하는 것이 실제 전파환경 변화를 보다 적절하게 나타낼 수 있다.

다만 본 연구에서 산출한 LOS 변화는 실효지구반경 계수에 기반한 기하학적 가시선 변화로, 실제 탐지 거리를 직접 의미하지는 않는다. 실제 레이더 성능은 해면 클러터, 다중경로, 전파손실, 안테나 특성 및 표적 특성 등의 영향을 동시에 받으며, 강한 덩트 환경에서는 단순 k-factor 모델만으로 전파 포획과 음영 구역을 완전히 설명하기 어렵다. 따라서 향후에는 저고도 굴절도 관측자료와 전파전파모델 또는 실제 레이더 시험자료를 연계하여 탐지확률과 탐지거리 변화까지 확장할 필요가 있다.

본 연구는 실측 라디오존데 자료를 기반으로 저고도 대기굴절의 월별·계절별·일별 변동을 정량화하고, 분석 고도층의 설정에 따라 함정 탐재 레이더의 가시선 평가 결과가 달라질 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 해상 저고도 전파환경을 반영한 레이더 운용성 분석과 시험평가 조건 설정을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Ernest K. Smith & Stanley Weintraub, 'The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies,' Proceedings of the IRE, VOL. 41, NO. 8, 1953, pp. 1035-1037.
- [2] Gordon D. Thayer, 'An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air,' Radio Science, VOL. 9, NO. 10, 1974, pp. 803-807.
- [3] Seong Hwa Jeong & GyuWon Lee, 'Statistical Characteristics of Atmospheric Conditions Related to Radar Beam Propagation Using Radiosonde Data in 2005-2006,' Journal of the Korean Earth Science Society, VOL. 31, NO. 6, 2010, pp. 584-599.
- [4] Steven M. Babin, George S. Young, & James A. Carton, 'A New Model of the Oceanic Evaporation Duct,' Journal of Applied Meteorology and Climatology, VOL. 36, NO. 3, 1997, pp. 193-204.
- [5] Ian M. Brooks, Andreas K. Goroch, & David P. Rogers, 'Observations of Strong Surface Radar Ducts over the Persian Gulf,' Journal of Applied Meteorology and Climatology, VOL. 38, NO. 9, 1999, pp. 1293-1310.
- [6] Denny P. Alappattu, Qing Wang, & John Kalogiros, 'Anomalous Propagation Conditions over Eastern Pacific

Ocean Derived from MAGIC Data,' Radio Science, VOL. 51, NO. 7, 2016, pp. 1142-1156.

[7] Myung-Hoon Park, Woo-Joong Jeon, Hyun-Wook Moon, Se-Woong Kwon, Sang-Hyun Kim, & Ki-Won Lee, 'Analysis of Radar Performance Using Measured Domestic Atmospheric Data,' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 34, NO. 5, 2023, pp. 415-423.

[8] TaeYoung Oh, Min An, Junmo Yang, Jun Heo, Myoungjun Ko, Hyosoon Choi, Yangwon Kim, & Yong Bae Park, 'DMFT Parabolic Equation Based Propagation Analysis Considering Ducting and Sea Surface,' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 36, NO. 3, 2025, pp. 262-265.