

# 산악 및 고층 기상 데이터를 활용한 대기 굴절률 보간 기법

## Atmospheric Refractivity Interpolation Method Using Mountain Weather and Radiosonde Data

안 민<sup>1</sup> · 손성환<sup>2\*</sup> · 조재연<sup>3\*</sup> · 남아리<sup>4\*</sup> · 박용배<sup>5</sup>

Min An<sup>1</sup> · Sung Hwan Sohn<sup>2\*</sup> · Jae Yeon Jo<sup>3\*</sup> · A Ri Nam<sup>4\*</sup> · Yong Bae Park<sup>5</sup>

### 요약

본 논문에서는 산악 기상 관측 데이터를 활용한 개선된 대기 굴절률 보간 방법을 제안한다. 기존의 고층 기상 관측 데이터만을 이용한 IDW 보간 기법이 산악 지역의 복잡한 지형 효과와 국지적 기상 현상을 충분히 반영하지 못하는 한계를 극복하기 위해, 강원도 지역 산악 기상 관측소의 측정 데이터를 추가로 활용하였다. 제안된 방법은 지수적 가중치 분배 방식을 통해 산악 관측소의 지표면 굴절률을 상층으로 전파시켜 고층 기상 관측 데이터와 함께 고려하는 보간 기법을 고안하였다. Leave-one-out 교차검증을 통한 성능 평가 결과, 기존 방법 대비 현저한 정확도 향상을 달성하였다. 제안하는 방법은 산악 지역에서 운용되는 레이더나 통신 시스템의 성능 예측 및 운용 최적화에 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

### Abstract

This study proposed an improved atmospheric refractivity interpolation method using mountain weather station data. To overcome the limitations of conventional IDW interpolation techniques that used only upper-air meteorological station data, that inadequately reflected complex terrain effects and local meteorological phenomena in mountainous regions, surface meteorological data from mountain weather stations in Gangwon Province were additionally incorporated. The proposed method developed a novel interpolation technique that propagated surface-level refractivity from mountain stations to the upper layers through an exponential weighting distribution and considered it together with upper-air meteorological data. The performance evaluation through leave-one-out cross-validation demonstrated significant improvements in accuracy compared with conventional methods. The proposed method is expected to significantly contribute to the performance prediction and operational optimization of radar and communication systems operating in mountainous regions.

Key words: Atmospheric Refractivity, Mountain Weather Station, Spatial Interpolation, Exponential Weighting, Radiosonde Data

### I. 서론

전파는 대기 중에서 기압, 기온, 수증기압에 의해 결정되는 대기 굴절률의 변화에 따라 굴절되어 전파하는 특성을 가진다<sup>[1]</sup>. 이러한 대기 굴절 현상은 레이더, 위성통

신 등 전파를 활용하는 시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치며<sup>[2]</sup>, 특히 방공 레이더가 산악 지역에 위치할 경우, 고층 기상 관측 정보뿐만 아니라 산악 지역에서의 기상 정보로부터 도출한 대기 굴절률을 레이더 전파 굴절 분석에 적용해야 정확한 굴절 분석이 가능하다.

†이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-038-01).

아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of AI Convergence Network, Ajou University)

\*LIG넥스원(LIG Nex1)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0009-0008-4302-5044>), 2: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9401-7182>),

3: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0007-5664-9721>), 4: 연구원(<https://orcid.org/0009-0003-7292-7147>), 5: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>)

· Manuscript received October 21, 2025 ; Revised November 3, 2025 ; Accepted November 14, 2025. (ID No. 20251021-128)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: [yong@ajou.ac.kr](mailto:yong@ajou.ac.kr))

산악 지역은 복잡한 지형으로 인해 온도 역전, 국지풍 시스템, 지형성 강수 등의 독특한 기상 특성을 보이며<sup>[3]</sup>, 이는 대기 굴절률 분포에 상당한 영향을 미친다. 특히 우리나라처럼 국토의 65 % 이상이 산지로 구성된 지형에서는 산악 지역의 복잡한 기상 현상이 대기 굴절률의 공간적 변화를 더욱 복잡하게 만든다. 기존의 대기 굴절도 보간 관련 연구들은 주로 국내 7개의 고층 기상 관측소에서 측정된 고도별 기상 데이터를 기반으로 IDW나 Kriging 등의 공간 보간 기법을 사용하여 수행되어 왔다<sup>[4],[6]</sup>. 그러나 이러한 고층 기상 관측소들은 대부분 해안가나 평지 지역에 위치하여, 산악 지역의 복잡한 지형적 특성과 국지적 기상 현상을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다.

이에 본 논문에서는 강원도 지역에 설치된 산악 기상 관측소 데이터를 추가로 활용한 대기 굴절률 보간 방법을 제안한다. 관측소는 해발 200 m에서 1,500 m에 이르는 다양한 고도에 위치하며 152개가 존재한다. 각 관측소에서 측정된 기온, 상대습도, 정규화된 해면 기압 데이터를 통해 산악 지역의 국지적 기상 특성을 보다 정확하게 반영할 수 있다. 본 논문에서는 leave-one-out 교차검증을 통해 기존의 고층 기상 관측 데이터만을 활용한 대기 굴절도 보간 방식과 산악 기상 관측 데이터를 추가로 고려한 보간 방식을 비교 분석하여, 제안하는 방법이 산악 지역의 대기 굴절률 예측에 있어 더 높은 정확도를 제공함을 입증하였다.

## II. 본 론

University of Wyoming에서 제공하는 고층 기상 관측 데이터는 라디오존데(radiosonde) 관측을 통해 수집된다. 라디오존데는 기상 관측 장비를 장착한 풍선을 대기 중으로 비행시켜 고도에 따른 기압, 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속 등을 측정하는 시스템이다. 국내에서는 기상청이 운영하는 7개 관측소에서 매일 00시와 12시에 라디오존데를 비행시켜 지상부터 약 30 km 고도까지 평균 8 m 간격으로 기상 데이터를 수집한다<sup>[7]</sup>. 본 연구에서는 지구 곡률을 고려한 수정 대기 굴절도(M)를 사용하였다<sup>[1]</sup>.

$$M = \frac{77.6P}{T} - \frac{5.6e}{T} + \frac{3.75 \times 10^5 e}{T^2} + \frac{10^6 \times z}{R_e} \quad (1)$$

$P$ : 기압 [hPa],  $T$ : 기온 [K],  $e$ : 수증기압 [hPa],  
 $R_e$ : 지구반지름 [6378 km],  $z$ : 고도 [km]

기존의 3차원 대기 굴절도 보간은 고층 기상 관측소 데이터를 바탕으로 한 역거리 가중(IDW) 보간 기법을 활용하여 수행되었다. 이 방법은 각 고도 평면에서 다음 수식 (2)와 같은 2차원 IDW 보간을 순차적으로 적용하여 3차원 굴절도 분포를 구성한다.

$$\hat{M}(x, y, z) = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i / d_i^2)}{\sum_{i=1}^n (1 / d_i^2)} \quad (2)$$

여기서  $M_i$ 는  $i$ 번째 관측소에서의 수정 대기 굴절도,  $d_i$ 는 예측 지점과  $i$ 번째 관측소 간의 거리이다. 다음의 그림 1은 국내 7개 지역에 위치한 고층 기상 관측소 데이터를 활용한 24년 7월 31일 00시 강원도 산악 지역에 대한 3차원 굴절도 보간 결과에서 고도 약 1,000 m에서의 굴절도 분포이다.

하지만, 이러한 고층 기상 관측 데이터만 활용한 방식은 고층 기상 관측소가 위치한 해안가나 평지 지역의 기상 특성은 잘 반영하지만, 산악 지역의 복잡한 지형 효과와 국지적 기상 현상은 충분히 고려하지 못하는 한계를 가진다. 이에 본 기상청에서 운영하는 산악 기상 관측시스템의 데이터를 추가로 활용하였다. 강원도 지역에 위치한 산악 기상 관측소들은 매분 단위로 해당 관측소의 해발고도를 기준으로 지상 2 m와 10 m 높이에서 기온, 상대습도를 측정하고, 정규화된 해면기압 값을 제공한다. 해면기압을 관측소의 해발 고도 기압으로 보정하여 활용하였다. 2 m와 10 m 높이의 고도 간의 차이가 매우 작아, 본 연구에서는 10 m 높이에서 측정된 데이터만을 활용하여 각 산악 관측소의 대기 굴절도를 계산하였다. 산악 기상 관측 데이터를 기존 고층 기상 관측 데이터와 함께 고려하기 위해서, 가중치 분배 방식을 적용하였다. 대기 굴절도는 고도에 따라 지수적 감쇠 특성을 보이며<sup>[1]</sup>, 기상학 연구에서 지표면 관

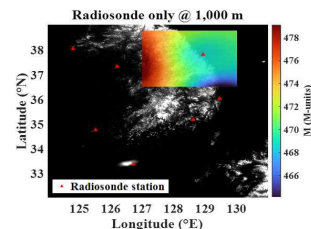


그림 1. 1,000 m에서의 굴절도 분포(고층 기상 데이터 기반 보간)

Fig. 1. Refractivity distribution at 1,000 m (radiosondebased interpolation).

측값의 영향이 상층으로 전달되는 과정은 일반적으로 지수함수 형태의 가중치로 모델링되어 왔다<sup>[8],[9]</sup>. 이러한 물리적 근거를 바탕으로 식 (3)과 같이 j번째 산악 관측소 위 10 m에서 계산된 대기 굴절도를 상위 고도로 지수적으로 분배하는 가중치 방식을 적용하였다.

$$\omega(h) = \exp\left(-\frac{h-h_s}{L}\right), (h > h_s) \quad (3)$$

$\omega(h)$ 는 고도 h에서의 수직 가중치를 나타낸다.  $h_s$ 는 산악 관측소의 높이(해발고도+10 m), h는 보간하고자 하는 고도, L은 대기 경계층의 특성 길이를 나타내는 매개변수로<sup>[9]</sup>, 산악 지역 대기 특성을 고려하여 100 m를 사용하였다. 이 가중치는 관측소 높이 이상에서만 적용되며 고도가 증가함에 따라 지수적으로 감소하여 물리적으로 합리적인 영향 범위를 갖도록 하였다. 또한 산악 관측소 데이터의 이상치 영향을 완화하기 위해 기본 가중치( $\omega_{mont}=0.3$ )를 적용하여 다음 식 (4)와 같이 j번째 산악 기상 관측소의 최종 가중치를 적용하였다. 기본 가중치  $\omega_{mont}$ 는 교차검증을 통한 파라미터 최적화로 결정하였다. 2024년 전체 데이터에 대해  $\omega_{mont}$ 를 0.1부터 1까지 변화시키며 leave-one-out 교차검증을 수행하고 0.3에서 최적화된 성능을 보였다.

$$\omega_j(h) = w(h) \times w_{mont} \quad (4)$$

이에 기존 고층 기상 관측 데이터와 산악 기상 관측 데이터를 모두 고려한 IDW 기반 3차원 대기 굴절률 보간은 다음 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$\hat{M}(x, y, z) = \frac{\sum_{RS} \frac{M_i}{d_i^2} + \sum_{MONT} \frac{w_j(h)M_j}{d_j^2}}{\sum_{RS} \frac{1}{d_i^2} + \sum_{MONT} \frac{w_j(h)}{d_j^2}} \quad (5)$$

식 (5)는 식 (2)의 IDW 보간을 확장한 형태로, 고층 관측소는 거리 기반 가중치를, 산악 관측소는 거리 및 고도 기반 가중치를 적용하였다. RS(radiosonde)로 표기된 분자의 첫 번째 항은 고층 기상 관측소들의 기여도를 나타내며 기여도를 나타내며,  $M_i$ 는 i번째 관측소에서의 수정 대기 굴절도  $d_i$ 는 예측 지점과 i번째 관측소 간의 거리이다. MONT(mountain)로 표기된 두 번째 항은 산악 관측소들의 기여도를 나타내며  $\omega_j(h)$ 는 j번째 산악 관측소의 고도

별 가중치,  $M_j$ 는 j번째 산악 관측소의 대기 굴절도이다.

산악 관측소의 영향 범위는 해당 고도로부터 위로 300 m까지로 제한하였다. 산악 지역의 대기 경계층은 평지와 달리 지형의 복사 가열·냉각, 사면풍 및 계곡풍과 같은 국지 순환에 의해 지배되는데, 대기 경계층 연구에 따르면 산악 경계층은 대체로 수백 미터 수준 이내의 특성을 갖는다<sup>[8],[10]</sup>. 이러한 산악 지역 대기 경계층의 특성을 고려하여 300 m를 선택하였으며, 이를 통해 국지적 지형 효과는 충분히 반영하되 과도한 상층 확산을 방지하였다.

그림 2는 이 보간 방식을 적용하여 그림 1과 동일한 지역에 대해 대기 굴절도 보간을 실시한 고도 1,000 m에서의 굴절도 분포이다. 기존 고층 기상 관측 데이터만 활용한 보간과 경향은 비슷하나, 국지적으로 산악 기상이 고려되었음을 알 수 있다.

제안된 보간 기법의 정확성을 검증하기 위해 leave-one-out 교차검증을 시행하였다. 강원도 지역 산악 기상 관측소 중 하나를 검증 대상으로 선정하고, 해당 관측소를 제외한 나머지 151개 산악 관측소와 7개 고층 기상 관측소의 데이터로 검증 대상 위치의 대기 굴절률을 보간하였다. 보간된 값은 검증 대상 관측소에서 측정된 기상 데이터(기온, 상대 습도, 정규화 해면기압)를 식 (1)에 대입하여 계산한 굴절률 실측값과 비교하였다. 이 과정을 152개 모든 산악 관측소에 대해 반복 수행하여 보간 정확도를 평가하였다. 비교 대상으로는 고층 기상 관측소 데이터만을 사용한 기존 IDW 보간 방법을 사용하였으며, 동일한 leave-one-out 방식으로 검증하였다. 성능 지표로는 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균 절대 오차(MAE)를 활용하였다. 두 보간 방법의 성능 비교 결과는 표 1과 같다.

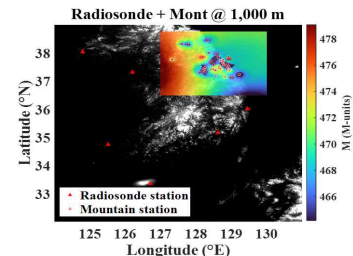


그림 2. 1,000 m에서의 굴절도 분포(고층 기상 및 산악 기상 기반 보간)

Fig. 2. Refractivity distribution at 1,000 m (radiosonde and mountain-based interpolation).

표 1. 보간 기법에 따른 오차 분석

Table 1. Error analysis by interpolation method.

	Radiosonde only	Radiosonde+mountain
RMSE (M-unit)	21.395	12.59
MAE (M-unit)	18.42	8.79

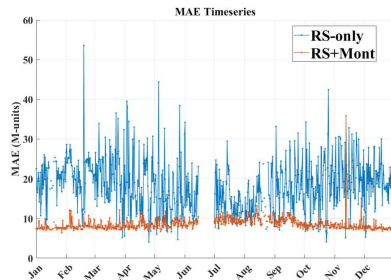


그림 3. 보간 방식별 MAE 시계열 비교

Fig. 3. Annual MAE time series comparison.

산악 기상 관측소 데이터를 활용한 보간 방법이 모든 평가 지표에서 현저한 성능 향상을 보였다. RMSE는 21.395 M-unit에서 12.59 M-unit로 약 41 % 감소하였고, MSE는 18.42 M-unit에서 8.79 M-unit로 약 52 % 감소하였다. 그림 3은 2024년 연간 MAE 시계열을 보여준다. 고층 기상만 고려한 보간 방식(파란색)은 20~40 M-unit의 높은 MAE와 큰 변동성을 보이며, 특히 겨울철에 더 높은 오차를 나타낸다. 반면 고층 기상 및 산악 기상 관측 데이터를 고려한 방식(주황색)은 연중 5-12 M-unit의 낮은 MAE를 일관되게 유지하여 큰 오차 감소 효과를 보인다. 이는 산악 기상 데이터를 고려한 본 방식이 안정적인 예측 성능 향상을 제공함을 입증한다.

### III. 결 론

본 연구에서는 기존의 고층 기상 관측소 데이터만을 활용한 대기 굴절률 보간 방식의 한계를 극복하기 위해 강원도 지역 산악 기상 관측소 데이터를 추가로 활용한 개선된 보간 기법을 제안하였다. 지수적 가중치 분배 방식을 통해 산악 기상 관측 데이터를 효과적으로 고려한 결과, leave-one-out 교차검증에서 RMSE 41 % 감소, MSE 52 % 감소의 현저한 성능 향상을 달성하였다. 이는 산악 지역의 복잡한 지형적 특성과 국지적 기상 현상이 대기 굴절률 분포에 미

치는 영향을 보다 정확하게 반영할 수 있음을 입증한다. 따라서 본 연구에서 제시하는 방식은 특히 산악 지역에서 운용되는 레이더나 통신 시스템의 성능 예측 및 운용 최적화에 중요한 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] *The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data*, ITU-R P.453-14, Aug. 2019.
- [2] 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.
- [3] C. D. Whiteman, *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*, New York, NY, Oxford University Press, 2000.
- [4] D. Jang, N. Kim, and H. Choo, "Kriging interpolation for constructing database of the atmospheric refractivity in Korea," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 13, p. 2379, Jul. 2024.
- [5] J. Yang, J. Heo, J. H. Kim, Y. J. Park, H. Choo, and Y. B. Park, "Predicting atmospheric refractivity over the Korean peninsula using deep learning techniques," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 6, pp. 493-496, Jun. 2023.
- [6] S. Wang, T. H. Lim, K. Oh, C. Seo, and H. Choo, "Prediction of wide range two-dimensional refractivity using an IDW interpolation method from high-altitude refractivity data of multiple meteorological observatories," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1431, Feb. 2021.
- [7] University of Wyoming Department of Atmospheric Science, "Upper air sounding data," 2026. Available: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml>
- [8] R. B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [9] J. C. Kaimal, J. J. Finnigan, *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, Oxford, Oxford University Press, 1994.
- [10] S. F. J. de Wekker, M. Kossmann, "Convective boundary layer heights over mountainous terrain: A review of concepts," *Frontiers in Earth Science*, vol. 3, p. 77, Dec. 2015.