

레이더에서 고고도 표적물의 고도 예측 성능 향상을 위한 한국형 지수 모델 개발에 관한 연구

Development of Exponential Model of Korea for Improved Altitude Estimation Performance of High-Altitude Target at Radar System

문현욱 · 전민현* · 김우중 · 오성근* · 이종현** · 권세웅** · 윤영중

Hyunwook Moon · Min-Hyun Jeon* · WooJoong Kim · Seong Keun Oh* · Jong Hyun Lee** · Sewoong Kwon** · Young Joong Yoon

요 약

본 논문에서는 레이더 이용 시 대기 굴절에 의한 고고도 표적물의 고도 오차를 최소화하기 위한 한국형 지수 모델을 제안하였다. 이를 위해 한국 7개 기상 관측소에서 6년간 측정된 데이터를 바탕으로 표면 굴절도(surface refractivity)와 굴절도 감쇄율(refractivity gradient) 간의 상관 관계를 최소 자승법을 이용하여 도출하고, 이를 지수 모델에 적용하였다. 또한, 제안된 모델의 검증에 위해 표준 대기(standard atmosphere) 모델, CRPL(Central Radio Propagation Lab.) 지수 모델, 제안된 한국형 지수 모델에 대한 고도 오차를 광선 추적법을 이용하여 도출하고, 그 특성을 분석하였다. 그 결과, 표준 대기 모델에 비해서는 50~60 %, CRPL 지수 모델에 비해서는 약 60 % 수준의 고도 오차를 나타내 제안된 모델을 적용 시 레이더의 고도 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, an exponential model of Korea is proposed to minimize an altitude-error of high-altitude target due to atmosphere refraction at radar system. The relation between surface refractivity and refractivity gradient, which is extracted using the least square fit from the measured data at 7 weather stations, is applied to the exponential model. And in order to verify the proposed model, the altitude-errors for a standard atmosphere, a CRPL(Central Radio Propagation Lab.) exponential model, the proposed model are extracted and analyzed using a ray tracing. As a result, the proposed model can improve the altitude estimation performance of radar compared to conventional atmosphere refractive index models.

Key words : Altitude Error, Exponential Model, Radar, Refractivity, Ray Tracing

I. 서 론

세계 2차 대전 이후 레이더를 이용한 대공 감시

체계 구축에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다^{[1],[2]}. 특히 최근 전투기를 이용한 기습 공격이 효과적인 공격 수단으로 부상하고 있고, 전투기의 속도가 날

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD100002KD).」
연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*아주대학교 전자공학과(School of Electronics Engineering, Ajou University)

**LIG Nex1 ISR 연구센터(ISR Research Center, LIG Nex1)

· Manuscript received April 30, 2012 ; Revised June 14, 2012 ; Accepted June 21, 2012. (ID No. 20120430-053)

· Corresponding Author : Young Joong Yoon (e-mail : yjyoon@yonsei.ac.kr)

로 빨라지고 있어 대공 감시 체계의 핵심이 되는 레이더에 대한 중요성이 날로 높아지고 있다.

레이더 시스템의 탐지 능력은 운용 환경에 따른 여러 전파 요소들에 의해 결정된다^[3]. 이러한 전파 요소로는 굴절, 다중 경로에 의한 간섭, 공기 중의 가스나 비에 의한 감쇄 등이 있으며, 특히 굴절 및 다중 경로에 의한 간섭은 적 위치 식별 오차를 유발하게 된다. 이 중 저고도 표적물의 경우, 주로 지면 또는 해수면에서의 반사 및 회절에 의한 다중 경로 간섭이 표적물의 고도 오차를 유발하게 되며, 이를 보상하기 위한 추적 알고리즘에 대한 연구가 국내외적으로 이루어져 왔다^{[4],[5]}. 반면, 고고도 표적물의 경우, 주로 대기권 내에서의 고도에 따른 굴절을 변화에 의한 굴절이 표적물의 고도 오차를 유발하게 된다^[3]. 따라서 대기권 내의 굴절을 변화에 대한 정확한 정보는 고고도 표적물 탐지 시 표적물의 고도를 예측하는 데 있어 매우 중요하다.

한편, 레이더 사이트에서 고도에 따른 굴절을 변화를 측정하는 것은 어렵기 때문에, 고도별 굴절률에 대한 모델링 연구가 다각도로 이루어져 왔다. 이 중 가장 대표적인 것이 전 세계 기상 관측소에서 측정된 데이터를 기반으로 1976년 개발된 미국 표준 대기 모델이 있다^[6]. 고도에 따른 굴절을 변화에 대한 정보가 없는 경우, 굴절을 고려하기 위해 통상적으로 이 표준 대기를 적용하고 있으나, 이러한 표준 대기는 시간 및 공간에 따른 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 이와는 달리 고도에 따른 굴절을 변화를 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율에 따른 지수 함수로 나타낸 지수 모델들이 연구되었다^{[7],[8]}. 이러한 지수 모델은 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율을 이용하기 때문에 시간과 공간에 따른 특성 반영이 가능하다는 장점이 있으나, 레이더 사이트에서 굴절도 감쇄율을 측정하는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 CRPL 지수 모델은 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율과의 관계를 근사화하고, 이를 지수 모델에 적용함으로써 표면 굴절도에 대한 정보 획득만이 가능한 레이더 사이트에서 고도에 따른 대기 굴절을 변화를 예측하는 데 매우 유용하다^[8]. 그러나 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율과의 상관도가 미국 기상 관측소에서 측정된 데이터를 바탕으로 도출되었기 때문에 국내 기상 환경을 반영하기에는

어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 국내 7개 기상관측소에서 측정된 기상 데이터를 기반으로 국내 기상 환경을 반영한 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율의 관계식을 도출하고, 이를 적용한 한국형 지수 모델을 제시하였다. 또한, 광선 추적법을 이용하여 기존의 표준 대기 모델, CRPL 지수 모델, 한국형 지수 모델에 대한 각각의 고도 오차 특성을 도출하고, 이를 비교함으로써 본 논문에서 제안된 한국형 지수 모델 이용 시 개선된 표적물의 고도 예측 성능에 대하여 분석하였다.

II. 대기 굴절을 모델링

2-1 전파 굴절도(Radio Refractivity)

대기의 굴절률은 시간과 공간에 따라 변하지만 1에 매우 근사한 값으로 그 변화가 매우 작다. 따라서 굴절률은 무선 전파의 관점에서 나타내기 편리한 전파 굴절도를 사용하여 나타내며, 대기 굴절률(n)과 전파 굴절도(N)는 다음과 같은 관계에 있다^{[9],[10]}.

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (1)$$

이 때 전파 굴절도는 Debye 공식에 의해 기상 환경에 따른 온도, 압력, 수증기압의 함수로 나타낼 수 있다^[11].

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

여기서 P 는 압력 [hPa], T 는 온도 [K], e 는 수증기압 [hPa]을 나타내며, 계수들은 실증적인 방법을 통해 도출하는 연구가 많이 이루어졌지만, 적용 범위 제한 및 정확성 문제로 인해 Smith와 Weintraub에 의해 도출된 계수가 통상적으로 적용되고 있다^[12]. 이렇게 전파 굴절도는 기상 환경에 의한 온도, 압력, 수증기압에 의해 결정되기 때문에 지역적 특성 및 계절 등에 영향을 받으며, 시공간적인 특성을 갖게 된다.

2-2 한국 전파 굴절도 도출

한국 전파 굴절도 데이터 수집을 위해 그림 1과 같이 국내 7개 기상 관측소에서 2004년부터 2009년까지 총 6년간 매일 2회(UTM 09:00, 21:00) 측정된

고도별 기상 데이터를 이용하였다. 기상 관측소는 속초, 백령도, 오산, 포항, 광주, 흑산도, 제주도이며, 오산과 광주는 육지에 위치하고 있고, 다른 기상 관측소는 해안가에 위치해 있다. 측정된 파라미터는 고도, 온도, 압력, 이슬점 온도가 있으며, 식 (2)를 통해 전파 굴절도를 도출하기 위해서는 식 (3)과 같이 이슬점 온도로부터 수증기압을 도출해야 한다^[13].

$$e = a \left(\exp \left(\frac{bT_d}{T_d + c} \right) \right) \quad (3)$$

여기서 e 는 수증기압 [hPa], T_d 는 이슬점 온도[°C]를 나타내며, 계수는 다음과 같다.

$$a = 6.112, b = 17.67, c = 243.5 \quad (4)$$

2-3 대기 굴절률 모델

레이더에서 표적물의 고도를 예측하기 위해선 대기 굴절을 고려할 필요가 있지만, 이를 측정하기란 매우 어렵다. 따라서 고도별 대기 굴절률 특성을 모델링하는 연구가 다각도로 이루어졌다. 그 대표적인 모델이 전 세계 기상 관측소에서 측정된 데이터의 평균을 이용한 표준 대기 모델이 있다^[6]. 그러나 식 (2)에서 보듯이 전파 굴절도는 압력, 온도, 수증기압의 함수로 공간 및 시간에 따라 달라지지만 표준 대기 모델의 경우 이를 고려할 수 없다는 단점이 있다.

이와는 달리 고도에 따른 굴절률 변화를 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율에 따른 지수 함수로 나타낸 지수 모델이 있다^{[7],[8]}. 지수 모델에 따른 고도별 전파 굴절도는 다음과 같이 계산된다.

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

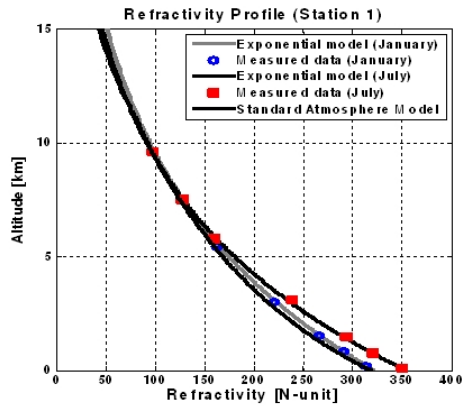
여기서 h 는 고도 [km]를 나타내고 N_s 는 표면 굴절도를 나타내며 N 은 고도 h 에서의 전파 굴절도를 나타낸다. 그리고 지수 감소 계수 c_c 는 다음과 같다.

$$c_c = \ln \frac{N_s}{N_{1km}} = \ln \frac{N_s}{N_s + \Delta N} \quad (6)$$

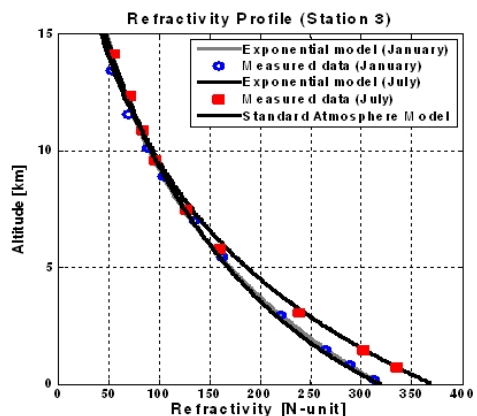
이 때 N_{1km} 는 고도 1 km에서의 전파 굴절도를 나타내고, 1 km까지 전파 굴절도의 감쇄는 선형적으로 근사화가 가능하기 때문에, 이는 $N_s + \Delta N$ 으로 표현할 수 있으며, ΔN 는 1 km까지의 굴절도 감쇄율을 나타낸다.



그림 1. 한국 기상 관측소
Fig. 1. Weather stations in Korea.



(a) 속초(Station 1)
(a) Sokcho(Station 1)



(b) 오산(Station 3)
(b) Osan(Station 3)

그림 2. 대기 굴절률 모델 비교
Fig. 2. Comparison of atmosphere refractive index models.

그림 2는 표준 대기 모델과 (a) 속초 및 (b) 오산에서의 1월과 7월 전과 굴절도 측정값, 그리고 이 측정 데이터로부터 도출한 N_s 와 ΔN 을 적용한 지수 모델을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 표준 대기 모델의 경우 시공간적인 변화 예측이 어렵다는 것을 알 수 있으며, 지수 모델의 경우 해안가 및 육지의 기상 관측소에서 측정값과 지수 모델이 잘 들어맞음을 확인할 수 있다. 따라서 지수 모델을 이용하면 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율만으로 실제 대기를 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

그러나 레이더 사이트에서 표면 굴절도는 측정하기가 간단하지만, 굴절도 감쇄율을 측정하기는 매우 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해 CRPL 지수 모델이 제안되었다^[8]. CRPL 지수 모델은 미국 45개 기상 관측소에서 6년간 측정된 데이터를 통해 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율이 지수적인 관계에 있음을 확인하고, 이를 최소자승법 (least squares fit)을 이용하여 다음과 같이 근사화하였다.

$$-\Delta N = 7.32 \exp(0.005577 N_s) \quad (7)$$

따라서 위 식을 이용하면 표면 굴절도로부터 굴절도 감쇄율을 도출할 수 있으며 이를 식 (5)와 식 (6)을 통해 지수 모델에 적용하여 고도에 따른 전파 굴절도를 모델링할 수 있다.

2.4 한국형 지수 모델

CRPL 지수 모델은 일반적으로 표면 굴절도만이 획득 가능한 레이더 사이트에서 표적물의 고도를 예측하는 데 있어 매우 유용한 모델이지만, 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율의 관계가 미국 기상 관측소 데이터를 기반으로 도출되어 한국의 지역적 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 국내 기상 관측소별 측정 데이터로부터 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율 간의 관계를 최소자승법을 통해 도출하였으며, 이를 지수 모델에 적용되어 한국형 지수 모델을 제안하였다. 그림 3은 제주도 기상 관측소에서의 표면 굴절도에 따른 굴절도 감쇄율에 대한 측정 데이터 샘플과 그 평균값, 그리고 그로부터 도출한 한국형 지수 모델에서의 표면 굴절도와 굴절도 상관 관계를 나타내었으며, 비교를 위해 CRPL 지수 모델에 대해 같이 도식하였다. 그 결과, 한국형 지수 모델이 CRPL

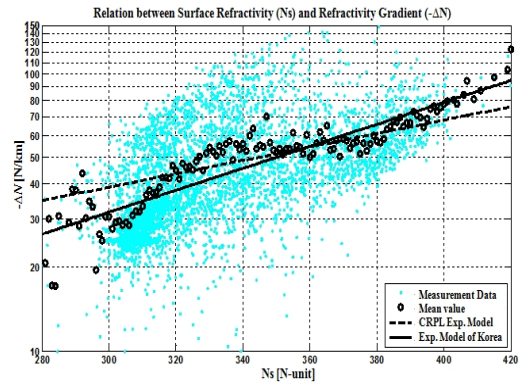


그림 3. 국내 기상 환경에서의 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율의 관계

Fig. 3. Relation between surface refractivity and refractivity gradient in Korea.

표 1. 기상 관측소별 한국형 지수 모델의 계수
Table 1. Constants for exponential model of Korea according to weather station.

Station number	위치	A	B
1	속초	1.87	0.009127
2	백령도	1.86	0.009325
3	오산	2.36	0.008374
4	포항	1.92	0.009436
5	광주	2.43	0.008492
6	흑산도	1.95	0.010336
7	제주도	1.96	0.010427

지수 모델에 비해 측정 데이터의 평균값에 보다 잘 들어맞음을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 방법을 통해 각 기상 관측소별로 아래 식의 계수 A, B를 도출하였으며, 그 값을 표 1에 나타내었다.

$$-\Delta N = A \exp(B N_s) \quad (8)$$

그 결과를 살펴보면, 저위도로 갈수록 고온 다습한 환경으로 인해 초기값 A 및 기울기 B가 증가하는 경향을 갖는다. 그리고 육지와 해안가에서의 특성을 비교하면 육지의 경우 초기값이 A가 높은 값을 갖는 반면, 지수의 기울기를 나타내는 B는 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 여름철에는 해안가에서 많은 수분으로 인한 수증기압의 영향으로 굴절도 감쇄율이 보다 크게 나타나는 반면에, 겨울철에는 수증기압에 의한 영향이 상대적으로 작고,

표 2. 기상 관측소별 측정 데이터와 CRPL 지수 모델 및 한국형 지수 모델의 오차에 대한 표준 편차 비교

Table 2. Standard deviation comparison of errors between measured data and CRPL exponential model / exponential model of Korea according to weather station.

Station number	위치	CRPL 지수 모델	한국형 지수 모델
1	속초	6.32	4.24
2	백령도	6.56	4.37
3	오산	7.52	4.34
4	포항	8.12	4.31
5	광주	6.89	4.30
6	흑산도	7.84	4.38
7	제주도	7.33	4.34

육지에서 대기 복사열에 의한 영향이 커지기 때문에 판단된다. 또한, CRPL 지수 모델과 한국형 지수 모델을 비교하면 CRPL 지수 모델의 초기값인 A 가 높고 기울기 B 가 낮게 나타나는데, 이는 미국의 경우 대륙의 영향이 큰 반면 한국은 삼면이 바다이기 때문에 해양의 영향으로 이러한 특성이 나타나게 된다.

그리고 한국형 지수 모델의 정확성에 대해 확인하기 위해 표 2에는 측정 데이터와 CRPL 지수 모델 및 한국형 지수 모델과의 오차에 대한 표준 편차를 나타내었다. 표 2의 결과에서 보면 한국형 지수 모델이 CRPL 지수 모델에 비해 측정 데이터와의 오차가 감소했음을 알 수 있으며, 기상 관측소에 따른 변동이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있어 한국형 지수 모델을 적용하면 한국 내의 시공간적인 특성을 보다 잘 반영할 수 있음을 확인할 수 있다.

III. 고도 오차 특성 분석

3-1 고도 오차 도출 모형

본 논문에서 제안한 한국형 지수 모델을 적용할 경우, 레이더의 고도 예측 성능 향상을 검증하기 위해서는 고도 오차를 도출하고, 그 특성을 분석할 필요가 있다. 따라서 그림 4와 같이 고도 오차 도출 모형을 구성하고, 그 특성을 확인하였다.

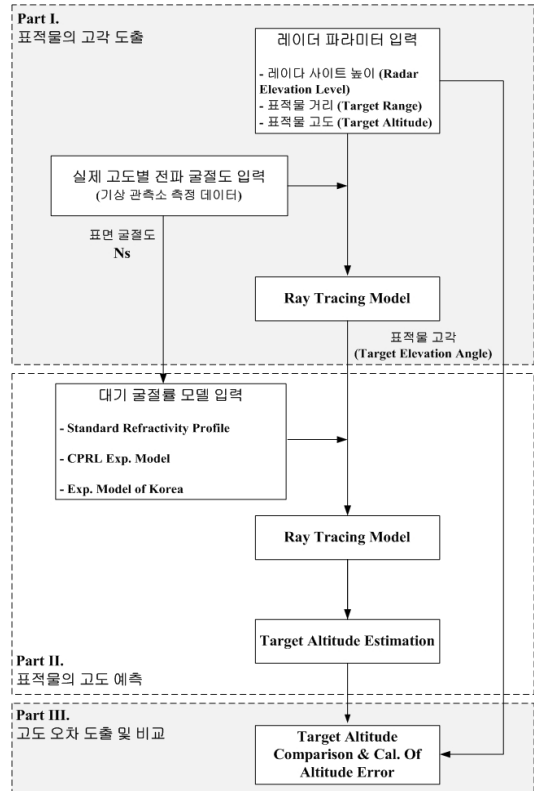


그림 4. 고도 오차 도출 모형

Fig. 4. Altitude-error extraction model.

레이더 사이트에서 표적물에 대한 고각(elevation angle)과 고도별 대기 굴절률(전파 굴절도) 정보를 알고 있다면 광선 추적법을 이용하여 표적물의 고도를 정확히 예측할 수 있다^[4]. 일반적으로 지향성 안테나와 신호 처리를 통해 표적물의 고각 정보는 추출 가능하지만, 고도별 대기 굴절률은 실시간으로 측정하기 매우 어렵다. 따라서 대기 굴절률 모델을 적용하여 표적물의 고도를 예측하게 된다. 그러나 대기 굴절률 모델에 의한 대기 굴절률은 실제 대기와 차이가 있기 때문에, 예측한 표적물의 고도와 실제 고도와는 차이가 발생하며, 이 값이 고도 오차가 된다. 이 과정을 적용하여 레이더에서 예측한 고도와 실제 표적물의 고도 오차를 도출하기 위해 고도 오차 도출 모형을 크게 부분으로 나누어 구성하였다.

Part I에서는 레이더에서 표적물의 고각 정보를 도출하기 위해 레이더 관련 파라미터와 실제 측정된 고도별 전파 굴절도를 입력으로 광선 추적법을 통해 표적물의 고각을 도출하게 된다. 레이더 파라미터로

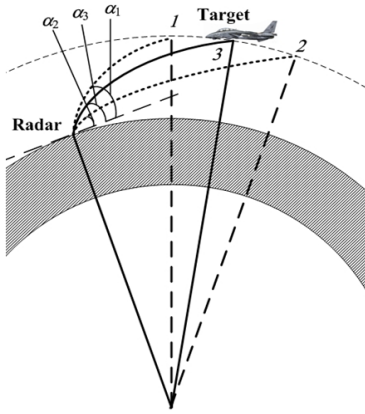


그림 5. 광선 추적법을 이용한 표적물의 고각 도출
Fig. 5. Extraction of elevation angle of target using ray tracing.

는 레이더 사이트의 높이와 실제 표적물의 거리 및 고도 정보가 입력하게 되며, 광선 추적법을 통해 표적물의 고각을 도출한다. 이 때 굴절을 고려하기 위해서는 단일 식으로 계산할 수 없기 때문에 그림 5에서와 같이 4/3 지구 굴절을 고려하여 계산된 최초 고각 α_1 에 대해 광선 추적을 수행하며, 수행 결과를 바탕으로 Newton-Raphson 방법을 이용하여 그 다음 고각 α_2 를 예측한다. 이러한 과정은 표적물의 위치에 대한 정확한 고각을 찾을 때까지 반복적으로 수행되며, 그림 5에서는 고각 α_3 가 최종적인 목표물에 대한 고각으로 도출되게 된다^[14].

Part II에서는 표적물의 고도 예측을 위해 Part I에서 도출된 표적물의 고각과 대기 굴절률 모델을 입력으로 광선 추적법을 이용하여 표적물의 고도를 예측하게 된다. 이 때 표준 대기 모델과 달리 CRPL 지수 모델과 한국형 지수 모델은 측정된 실제 표면 굴절도 값이 필요하므로, 이를 입력으로 받아 고도별 대기 굴절률을 계산하게 된다.

Part III에서는 표적물의 예측된 고도와 실제 고도를 이용하여 고도 오차를 계산하고 각 대기 굴절률 모델에 대한 고도 오차를 비교하도록 하였다.

3-2 고도 오차 특성 결과 및 분석

고도 오차 특성 도출 모형을 이용하여 고도 오차 특성을 분석하기 위해 설정한 실제 표적물의 거리와 고도, 그리고 레이더 사이트의 높이는 표 3과 같다.

표 3. 레이더 입력 파라미터
Table 3. Input parameters of radar.

레이더 파라미터	입력값
레이더 사이트 높이	100 [m]
표적물 거리	100 / 200 / 300 [km]
표적물 고도	8 [km]

레이더 사이트의 높이는 100 m로 설정하였고 거리는 100~300 km까지 100 km 단위로 변화시켰으며, 고도는 전투기가 운행하는 고도를 반영하여 8 km로 설정하였다.

그림 6은 각 대기 굴절률 모델을 적용했을 때의 월별 평균 고도 오차를 기상 관측소별로 나타낸 그림이다. 이 때 월별 특성을 살펴보면 여름철에는 고온 다습하여 굴절률 변화가 가장 심하고 겨울철에는 가장 작기 때문에 이를 비교하기 위해 1월과 7월의 대기 굴절률 값을 적용하여 도출하였다. 이를 위해 그림 4의 고도 오차 도출 모형에서 1/7월의 6년 간 측정 데이터를 실제 고도별 전파 굴절도로 입력하고 이에 대한 각 대기 굴절률 모델에 대한 고도 오차를 도출한 후 이를 평균하였다.

그 결과를 살펴보면, 모든 대기 굴절률 모델에 대해 고온 다습한 환경에 의해 수증기압에 따른 대기 굴절률 변화가 심한 여름철에 겨울철에 비해 평균 고도 오차가 크게 발생하는 경향을 보인다. 또한, 각 대기 굴절률 모델에 따라 살펴보면, 표준 대기 모델의 경우, 겨울철에는 섬에 위치한 백령도(St 2), 흑산도(St 6), 제주도(St 7)에서 오차가 가장 크게 발생하며, 육지에 위치한 오산(St 3), 광주(St 5)에서 오차가 가장 작게 나타났다. 그에 비해 여름철에는 겨울철과 마찬가지로 섬에서 고도 오차가 가장 크게 발생한 반면, 해안가에서 육지보다 고도 오차가 작게 나타났다. 이는 표준 대기 모델의 경우 내륙의 특성을 많이 받는 미국의 표준 대기를 기반으로 하는 반면, 섬의 경우 해양의 영향을 많이 받아 계절과 상관없이 온도 및 습도가 높기 때문이다. 그리고 해안가와 육지의 경우 계절에 따라 특성이 달리 나타나는 것은 육지의 겨울철에는 온도 및 습도가 낮아 표준 대기 모델과 비슷한 특성을 가지지만, 여름철에는 대지 복사열에 의한 영향을 많이 받아 온도가 해안가보다 높아 그에 대한 영향으로 오차가 크게 발생하기 때

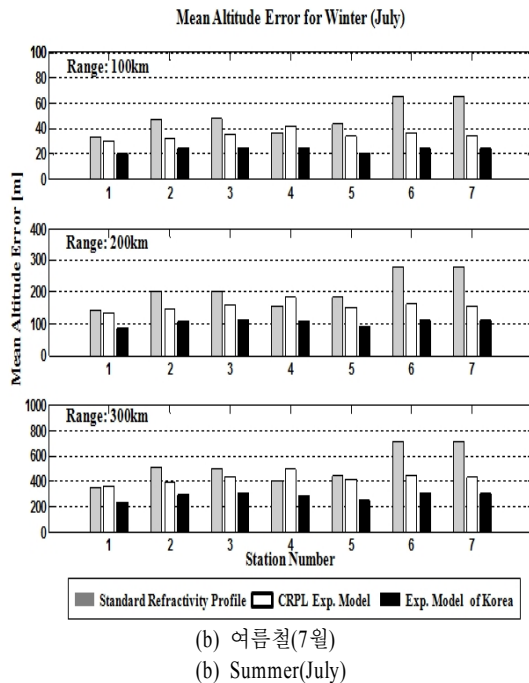
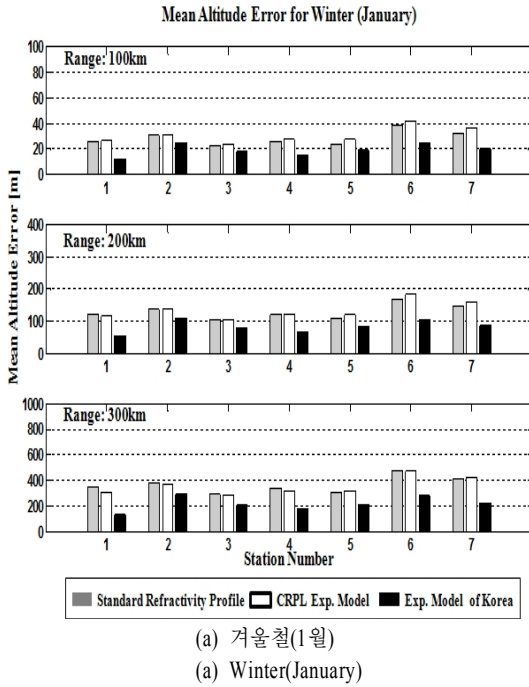


그림 6. 평균 고도 오차 비교
Fig. 6. Comparison of mean altitude-error.

문이다. CRPL 지수 모델의 경우엔 기상 관측소의 위치에 따른 뚜렷한 경향성이 나타나진 않지만 계절별 특성이 반영되기 때문에, 대체적으로 겨울철에는 표

표 4. 각 대기 굴절률 모델에 따른 고도 오차 비교
Table 4. Comparison of altitude-error according to atmosphere refractive index model.

1월	표준 대기 모델	CRPL 지수 모델	한국형 지수 모델
거리: 100 km	28.2 m	30.4 m 108.1 %	18.78 m 66.7 %
거리: 200 km	127.7 m	133.8 m 104.8 %	82.3 m 64.4 %
거리: 300 km	361.8 m	353.4 m 97.7 %	214.4 m 59.3 %
7월	표준 대기 모델	CRPL 지수 모델	한국형 지수 모델
거리: 100 km	47.9 m	34.5 m 72.2 %	22.9 m 47.8 %
거리: 200 km	206.3 m	155.2 m 75.3 %	103.1 m 50.0 %
거리: 300 km	516.0 m	421.9 m 81.8 %	281.9 m 54.6 %

준 대기 모델과 고도 오차가 거의 비슷하고, 여름철에는 표준 대기 모델에 비해 고도 오차가 감소하는 경향을 갖는다. 이는 CRPL 지수 모델의 정확성이 여름철에 보다 증가한다기보다는 표준 대기 모델의 부정확성이 여름철에 보다 커지기 때문으로 풀이된다. 그리고 한국형 지수 모델의 경우, 각 기상 관측소의 측정 데이터를 기반으로 제안되었기 때문에 기상 관측소에 따른 차이가 감소하였고, 고도 오차 특성은 표 2의 측정 데이터와의 표준 오차의 대소 특성과 거의 동일한 특성을 갖는다.

그리고 각 대기 굴절률 모델에 따른 고도 오차를 비교하기 위해 모든 기상 관측소에 대해 평균 고도 오차를 비교하고, 표준 대기 모델 대비 고도 오차 비(%)를 표 4에 나타내었다. 표준 대기 모델 대비 CRPL 지수 모델의 특성을 보면, 겨울철에는 표준 대기 모델과 CRPL 지수 모델의 고도 오차가 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있으며, 여름철에는 70~80%로 감소하는 효과를 보였다. 그에 비해 본 논문에서 제안한 한국형 지수 모델은 겨울철에는 59~67%, 여름철에는 47~55%로 고도 오차가 감소하여 표준 대기 모델은 물론 CRPL 지수 모델과 비교했을 때 표적물의 고도 예측 성능이 크게 향상됨을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 레이더 운용 시 대기 굴절에 의한 고고도 표적물의 고도 오차를 최소화함으로써 레이더의 고도 예측 성능을 향상시키기 위한 한국형 지수 모델을 제안하였다. 이를 위해 국내 7개 기상 관측소에서 6년간 측정된 기상 데이터를 기반으로 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율의 상관 관계를 최소자승법을 이용하여 도출하고, 이를 지수 모델에 적용하였다. 또한, 이렇게 제안된 모델에 대해 레이더에서의 고도 예측 성능 향상을 검증하기 위해 광선 추적법을 이용하여 고도 오차 도출 모형을 구성하였으며, 표준 대기 모델, CRPL 지수 모델, 그리고 제안된 모델에 대해 예측된 표적물의 고도와 실제 고도의 차이를 나타내는 고도 오차 특성을 도출하고 비교함으로써 본 논문에서 제안한 모델을 이용하면 레이더에서 표적물의 고도 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

제안된 한국형 지수 모델은 레이더는 물론 고정장거리 통신 시스템 등 대기 굴절에 영향을 받는 무선 전파 시스템에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] M. Skolnik, "Radar in the twentieth century", *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 15, pp. 27-44, Oct. 2000.

[2] 이용희, "레이더의 역할과 발달 전망", 한국전자학회, 전자과학기술, 8(1), pp. 2-28, 1997년 3월.

[3] M. Skolnik, *Radar Handbook, 3rd Ed.*, New York: McGraw-Hill, 2008.

[4] Y. Takabayashi, T. Matsuzaki, and H. Kameda, "Altitude estimation method using assumed altitude reliability based on multipath propagation model", *SICE Annual Conf. 2010*, Taipei, Taiwan, pp. 2196-2201, Aug. 2010.

[5] 정명수, 홍동희, 박동철, "다중 경로 환경 상태에서 다중 빔 탐색 레이더의 표적 고도 추출", 한국전자과학기술논문지, 18(10), pp. 1203-1210, 2007년 10월.

[6] ITU-R P.853-3, *Reference Standard Atmospheres*, 1999.

[7] B. R. Bean, G. D. Thayer, "On models of the atmospheric radio refractive index", *Proc. IRE*, vol. 47, no. 5, pp. 740, May 1959.

[8] B. R. Bean, G. D. Thayer, "CRPL exponential reference atmosphere", *Jour. Res. NBS*, vol. 63D, no. 3, pp. 315-317, Jun. 1959.

[9] J. Doble, *Introduction to Radio Propagation for Fixed and Mobile Communications*, Artech House, 1996.

[10] M. P. M. Hall, L. W. Barclay, and M. T. Hewitt, *Propagation of Radiowaves*, The Institution of Electrical Engineers, 1996.

[11] P. Debye, *Polar Molecules*, Dover, 1957.

[12] E. K. Smith, S. Weintraub, "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies", *Proc. IRE*, vol. 41, no. 8, pp. 1035-1037, Aug. 1953.

[13] <http://www.srh.noaa.gov/images/epz/wxcalc/rhTdFromWetBulb.pdf>

[14] T. S. Pittman, "A climatology-based model for long-term prediction of radar beam refraction", Master's thesis, School of Eng., Air Force Institute of Tech., Air Univ., Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999.

문 현 욱



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 전파 전파, 무선채널

이 중 현



1997년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
2005년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)
2005년 3월~현재: LIG Nex11 감시정찰연구소
[주 관심분야] 신호처리, 레이더, 통신채널모델링, 레이더 시스템 설계

전 민 현



템 엔지니어링

1983년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 8월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정
2007년 5월~현재: LIG Nex11 감시정찰연구소
[주 관심분야] 레이더 시스템, 시스템 엔지니어링

권 세 응



2005년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 전파 전파, 무선채널

김 우 중



2011년 2월: 경희대학교 전자정보학부 (공학사)
20011년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 전파 전파, 무선채널

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
1986년 12월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단
2011년~2011년: 한국전자과학회 학회장
1992년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC

오 성 근



[주 관심분야] 통신

1983년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
1990년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
1995년~현재: 아주대학교 교수