

## 광선 추적법을 이용한 우주 환경에서의 안테나 전파 특성 예측

# Prediction of Antenna Propagation Characteristic in Space Environment Using Ray Tracing Method

김 창 성 · 박 용 배

ChangSeong Kim · Yong Bae Park

### 요 약

우주 환경에서의 굴절률 변화를 고려하여 안테나의 전파 특성을 계산한다. 대류권, 성층권, 전리권의 유효 굴절률을 계산하고, 대기권을 통과하면서 굴절되고 감쇠되는 전파 특성을 계산하기 위해 광선 추적법, 기하광학법, 호이겐스의 원리를 이용한다.

### Abstract

We calculate the propagation characteristic of antennas considering refractive indices of space environments. The effective indices of troposphere, stratosphere, and ionosphere are computed and the ray tracing method, geometrical optics, and Huygens' principle are used to estimate refracted and attenuated electromagnetic wave of space environment.

Key words: Space Electromagnetic Environment, Ray Tracing Method, Geometrical Optics, Huygens' Principle

## I. 서 론

지상 및 위성체 간의 전파 경로 예측을 위해서는 대류권, 성층권, 전리권 등의 우주 전파 환경이 고려되어야 한다. 이를 위해 우주 전파 환경을 관측하기 위한 한국우주전파 관측망, 이오노존데, CSR(Coherent Scattering Radar) 등이 운영되고 있고, 효율적인 관측을 위해 IPS(Inter Planetary Scintillation), 태양전파 노이즈 관측기 등이 연구되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 우주 전파 환경을 고려하여 광선추적법, 기하 광학법 등의 전파 해석 기법으로 지상 및 위성체 간의 안테나 전파 특성을 계산하고 분석한 연구는 수행

되지 않았다.

본 논문에서는 지상에서 위성체까지의 우주 전파 환경을 고려하여 고도에 따라서 변화하는 안테나의 전자기적 특성을 예측한다. 위성과 지표면 간의 안테나의 전파 특성을 예측하기 위해서는 대류권, 성층권, 전리층 등의 우주 전파 환경을 고려하여 각 경계면에서 전파의 반사 및 투과를 계산하고, 이에 따른 전파의 감쇠 및 굴절을 계산해야 한다. 본 논문에서는 광선 추적법, 기하 광학법, 호이겐스의 원리를 이용하여 대류권, 성층권, 전리권의 경계면을 통과하면서 변화되는 안테나의 복사특성을 계산한다.

「이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.」

아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received October 17, 2016 ; Revised November 2, 2016 ; Accepted November 4, 2016. (ID No. 20161017-105)

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

II. 우주 전파 환경

대류권과 성층권에서의 전파 특성은 기상 요인에 의한 굴절률 변화의 영향이 크다. 지표면에서 약 50 km까지의 굴절률은 온도, 압력, 수증기압에 따라서 결정된다<sup>[2]</sup>.

$$N = (n - 1) \times 10^6 \tag{1}$$

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} p + \frac{3.37 \times 10^5}{T^2} e \tag{2}$$

그림 1은 와이오밍대학교에서 제공하는 실시간 기상정보와 위 수식을 이용하여 계산한 굴절률이다. 고도가 상승할수록 굴절률은 1에 수렴한다( $N$ 은 굴절계수,  $n$ 은 굴절률,  $T$ 는 온도[K],  $p$ 는 압력[mbar],  $e$ 는 수증기압[mbar]). 고도 50 km 이상의 대기권은 전리권으로 구분한다. 전리권의 대기는 플라즈마 이온 상태로 존재하기 때문에 전자 밀도와 관련되어 유효 유전율, 유효 전도율을 계산할 수 있다<sup>[3]</sup>.  $\omega_p \left( = \sqrt{\frac{Nq^2}{m\epsilon_0}} \right)$ 는 전자 밀도에 따른 변수이고,  $\omega_{eff}$ 는 전자 충돌 주파수이다.

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_{eff}^2} \right) \tag{3}$$

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \omega_{eff} \omega_p^2}{\omega^2 + \omega_{eff}^2} \tag{4}$$

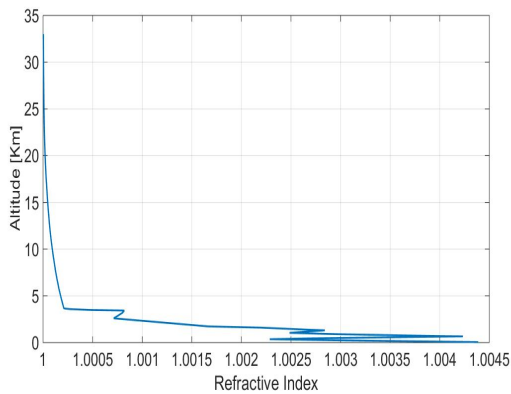


그림 1. 대류권 및 성층권의 굴절률(10. 14. 2016, 오산)  
Fig. 1. Index of refraction of the troposphere and stratosphere(10. 14. 2016, Osan).

표 1. 대기권의 분할

Table 1. Division of atmosphere.

고도	~10 km	~20 km	~80 km	~500 km	~35,768 km
$\epsilon_r$	1.006	1.0002	1	0.9997	1
$\sigma$ (s/m)	$10^{-15}$	$10^{-14}$	$10^{-13}$	$4.9 \times 10^{-}$	0

$$\mu = \mu_0 \tag{5}$$

우주 전파 환경을 고려한 전파 특성을 계산하기 위해 대기권을 대략적으로 분할하여 유효 유전율(3) 및 유효 전도율(4)을 계산하였다(표 1). 유효 투자율(5)의 경우, 자유공간에서의와 같은 값을 갖고 있다. 전리권에서의 전자 밀도는 전리권의 영향이 클 때의 값( $N = 10^{13} \text{elec}/m^2$ )을 사용했고,  $\nu$ 는 Balmain's formula<sup>[4]</sup>로 계산된 170 kHz를 사용하였다. 대류권과 전리권의 유효 투자율은 자유공간과 같은 값으로 근사된다. 따라서 대기권의 유효 유전율과 유효 전도율의 변화가 전파 투과 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

그림 2는 표 1에서 분할한 대기권 환경 및 광선 추적법을 사용하여 전파 경로를 계산한 결과를 나타낸다. 지면과 10° 각도로 입사된 경우, 대기권 환경을 고려하지

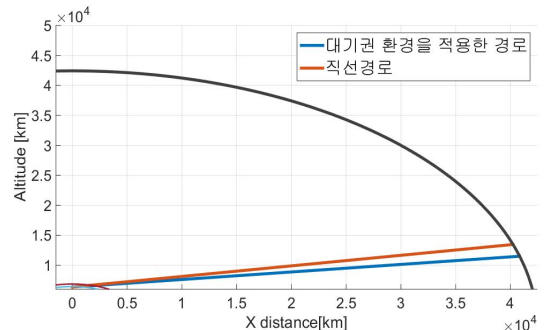


그림 2. 대기권 환경을 고려한 전파 경로(지면과의 각도 =10°)

Fig. 2. Propagation path in space environment.

표 2. 입사각도에 따른 수신점의 변화 각

Table 2. Changed angle of target depending on incident angle.

지면과의 각도	10	30	60	70
변화 각(°)	3.16	0.716	0.202	0.124

않은 경우와 수신점에서 3.16°의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 수신점의 고도는 정지 궤도 위성의 고도에 해당하는 35,768 km이다. 표 2는 대기권 환경을 고려하였을 때, 지면과의 입사각에 따른 수신점에서의 각도 오차를 나타낸다. 지면과의 각도가 커질수록(수직으로 입사할수록) 각도 오차는 감소함을 확인할 수 있다.

### III. 광선 추적법 알고리즘

경계면에서의 굴절, 감쇠를 계산하기 위해서는 광선 추적법이 이용되어야 한다. 광선 추적법의 해석 알고리즘은 광선 추적법과 기하 광학법, 호이겐스의 원리로 구성된다.

경계면에서의 투과를 구하기 위해서는 먼저 광선과 경계 표면과의 교점을 구해야 한다. 대기권 경계면을 구로 근사화하면 교점은 직접해를 이용해서 계산할 수 있다.

경계면과 광선의 교점에서는 입사파의 편파에 따른 반사 및 투과 계수가 다르게 정의된다. 따라서 입사파의 편파 분리 해석이 필수적이다. 투과계수는 교점에서 입사되는 면에 대해 평행한 성분과 수직인 성분으로 분리한 후 각 편파 계산식에 의해 계산된다<sup>[4]</sup>. 각 투과계수를 고려한 다음 편파의 합을 통해 전체 투과 전자기장을 구할 수 있다.

기하광학법은 전파의 입사, 반사, 굴절 전자기장을 근사하는 고주파 기법이다. 아래 수식을 이용하여 관측점의 전자기장을 경로에서 참조되는 점에서의 전자기장과 공간 감쇠 요소, 위상 요소를 이용해 계산할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$E(s) = E_s \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-\alpha s} e^{-j\beta s} \quad (6)$$

광선추적법과 기하광학법을 이용하여 대기권의 각 층에서 투과 전자기장을 계산할 수 있고, 대기권의 최종 표면에서는 호이겐스의 원리를 사용하여 표면 등가전류로부터 수신점에서의 전자기장을 계산할 수 있다.

본 논문에서 제시한 방법의 정확성을 확인하기 위하여, 그림 3에서 자유 공간에 가상의 표면을 설정하고, 광선추적법, 기하광학법, 호이겐스의 원리를 적용하여 혼안테나의 복사 패턴을 계산한 결과와 자유 공간에서의

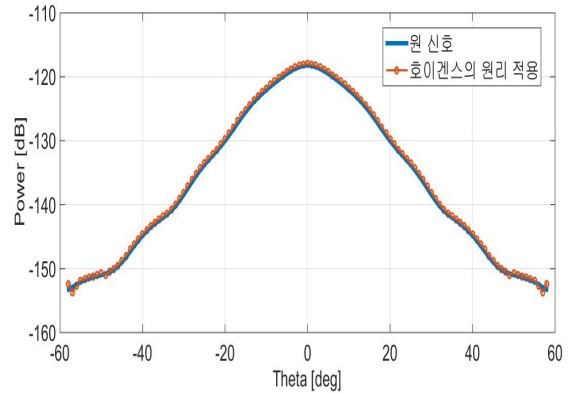


그림 3. 광선추적법 알고리즘을 적용한 혼 안테나 복사패턴  
Fig. 3. Radiation pattern of horn antenna using ray tracing algorithm.

혼 안테나의 복사패턴을 비교하였다. 계산에서는 피라미드 혼 안테나<sup>[6]</sup>를 사용하였다. 피라미드 혼 안테나의 최대 이득은 18.8 dB, 입력 전력은 1.2 dBm로 계산됐다. 그림에서 보는 바와 같이 두 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

### IV. 계산 결과 및 분석

그림 4와 5는 표 1에서 분할된 우주 전파 환경을 고려하여 광선추적법 알고리즘으로 계산한 혼안테나 복사패턴이다. 주파수는 1.575 GHz, 해석 공간은 실제 지구 크기의 1/1,000 모델을 이용했다.

그림 4는 안테나의 주빔이 지면과 60°로 입사할 때, 그림 5는 지면과 30°로 입사할 때 관측점에서의 안테나 복

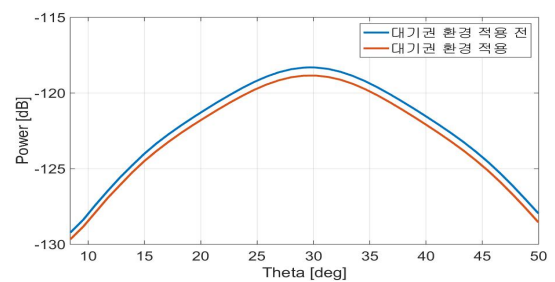


그림 4. 대기권 환경을 고려한 안테나 복사패턴(지면과 입사벡터 사이의 각도 -60°)  
Fig. 4. Radiation pattern of antenna in space environment (angle between ground and incidence vector -60°).

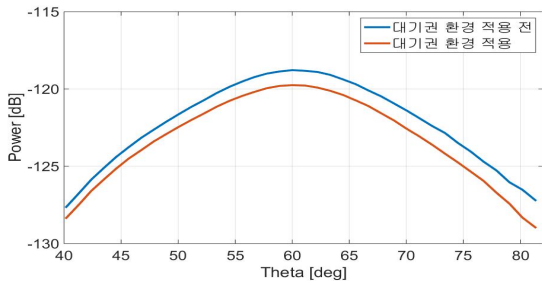


그림 5. 대기권 환경을 고려한 안테나 복사패턴(지면과 입사벡터 사이의 각도  $-30^\circ$ )

Fig. 5. Radiation pattern of antenna in space environment (angle between ground and incidence vector  $-30^\circ$ ).

사패턴을 나타낸다.

지면과의 각도가  $60^\circ$ 와  $30^\circ$ 일 때 대기권 환경을 고려하였을 때 입사파의 최대전력은 감소는  $0.54\text{ dB}$ ,  $0.97\text{ dB}$ 이고, 주빔의 이동은  $0.3^\circ$ ,  $0.2^\circ$ 로 나타났다. 지면과의 각도가 작을수록 최대 전력은 감소량이 증가했다. 표 2에서 광선추적법만으로 계산한 경우( $0.202^\circ$ ,  $0.716^\circ$ )와 비교하면, 전리권에서의 손실에 따라 각도 오차가 변화됨을 확인할 수 있다. 대기권에서는 광선의 경로거리에 따라서 손실의 크기가 달라지고, 대기권면과 입사하는 각도에 따라서 굴절, 감쇠가 일어난다. 따라서 수신점과 송신점의 위치에 따라서 각각의 복사패턴은 다르게 나타난다.

표 1에서의 대기권 분할 예는 대략적으로 대기권을 분할한 것이므로, 우주 전파 환경에서의 복사 패턴을 더 정확하게 계산하기 위해서는 대기권을 더 정밀하게 분할할 필요가 있다. 또한, 전리권에서의 전파 특성은 full-wave 수치 해석 기법 등을 사용하여 더 정확하게 해석할 필요가 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 우주 전파 환경을 고려한 안테나 전파

특성 예측을 위해 대기층에서의 전자파의 반사, 굴절, 투과 특성을 광선추적법, 기하광학법, 호이겐스의 원리를 이용하여 계산하였다. 광선추적법만을 고려하여 수신점에서의 광선의 위치를 계산한 결과와 비교하였을 때, 광선추적법, 기하광학법, 호이겐스의 원리를 이용하여 안테나 복사 특성을 계산한 결과의 각도 오차는 전리권의 손실에 따라 변화됨을 확인할 수 있었다. 실제 위성 운용 시 전파 특성 예측을 위해서는 전리권을 포함한 대기층에서의 굴절률을 더 정밀하게 계산하고, 이를 반영하여 안테나의 전파 특성을 계산할 필요가 있다.

## References

- [1] 이동진, "무선통신 · 우주전파 기술 동향", 한국전자파 학회논문지, 21(2), pp. 43-48, 2010년 3월.
- [2] 이태승, 최상혁, 전주환, 강성철, 박동민, "대기 효과를 고려한 전파 전달의 수학적 모델링 및 응용", 한국전자파학회논문지, 27(2), 2016년 2월.
- [3] Charles Herach Papas, *Theory of Electromagnetic Wave Propagation*, Dover Publications, pp. 175-178, 1988.
- [4] E. Spencer, S. Patra, T. Andriyas, C. Swenson, J. Ward, and A. Barjatya, "Electron density and electron neutral collision frequency in the ionosphere using plasma impedance probe measurements", *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, no. A09305, Sep. 2008.
- [5] Constantine A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd, John Wiley & Sons, Inc., pp. 287-296, 742-761, 2012.
- [6] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory Analysis And Design*, 2nd, John Wiley & Sons, Inc., pp. 682-695, 1997.