

## 아리랑위성 5호의 GPS 전파 엄폐 자료처리시스템 개발을 위한 전리층 전자밀도 산출

이우경<sup>1,3†</sup>, 정종균<sup>1</sup>, 조성기<sup>1,2</sup>, 박종욱<sup>1</sup>, 조정호<sup>1</sup>, 윤재철<sup>2</sup>, 이진호<sup>2</sup>, 천용식<sup>2</sup>, 이상률<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국천문연구원 우주측지연구부

<sup>2</sup>한국항공우주연구원 다목적 5호사업단

<sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교

### RETRIEVAL OF ELECTRON DENSITY PROFILE FOR KOMPSAT-5 GPS RADIO OCCULTATION DATA PROCESSING SYSTEM

Woo-Kyoung Lee<sup>1,3†</sup>, Jong-Kyun Chung<sup>1</sup>, Sungki Cho<sup>1,2</sup>, Jong-Uk Park<sup>1</sup>,  
Jung-Ho Cho<sup>1</sup>, Jae-Cheol Yoon<sup>2</sup>, Jin Ho Lee<sup>2</sup>, Yong-Sik Chun<sup>2</sup>, and Sang-Ryul Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Geodesy Division, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

<sup>2</sup>KOMPSAT-5 Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

<sup>3</sup>Korea University of Science & Technology, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: wklee@kasi.re.kr

(Received October 12, 2007; Accepted November 26, 2007)

#### 요 약

2010년에 발사될 예정인 아리랑위성 5호의 부 탑재체인 AOPOD(Atmosphere Occultation and Precision Orbit Determination) 시스템은 GPS(Global Positioning System) 전파 엄폐(radio occultation) 자료를 제공한다. 이 논문에서는 아리랑위성 5호 궤도에서 발생하는 GPS 전파 엄폐의 발생 빈도 및 분포를 시뮬레이션하고, 현재 천문연구원에서 개발 중인 GPS 전파 엄폐 자료처리시스템인 KROPS(KASI Radio Occultation Processing System)를 사용한 전리층 전자밀도 산출결과를 제시하였다. 전자밀도를 산출하기 위해 2004년 6월 20일에 발생한 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload) 위성의 GPS 전파 엄폐 관측값을 사용하였고 산출된 결과는 IRI(International Reference Ionosphere) - 2001 모델과 CHAMP 위성의 랑뮈어 탐침기(Planar Langmuir Probe) 및 이온존데 값과 비교하였다. 산출된 전자밀도를 이온존데 값과 비교했을 때, F<sub>2</sub>층 최대전자밀도 고도인 hmF<sub>2</sub>에서 약 5km, F<sub>2</sub>층 최대전자밀도인 NmF<sub>2</sub>에서 약  $3 \times 10^{10} \text{el/m}^3$ 의 차이를 보였으며, 랑뮈어 탐침기 값과 비교하여 고도 365.6km에서 두 값 모두  $1.6 \times 10^{11} \text{el/m}^3$ 로 일치하였다.

#### ABSTRACT

The AOPOD (Atmosphere Occultation and Precision Orbit Determination) system, the secondary payload of KOMPSAT (KOREA Multi-Purpose SATellite)-5 scheduled to be launched in 2010, shall provide GPS radio occultation data. In this paper, we simulated the GPS radio occultation characteristic of KOMPSAT-5 and retrieved electron density profiles using KROPS (KASI Radio Occultation Processing Software). The electron density retrieved from CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) GPS radio occultation data on June 20, 2004 was compared with IRI (International

---

†corresponding author

Reference Ionosphere) - 2001, PLP (Planar Langmuir Probe), and ionosonde measurements. When the result was compared with ionosonde measurements, the discrepancies were 5 km on the  $F_2$  peak height ( $hmF_2$ ) and  $3 \times 10^{10} \text{el/m}^3$  on the electron density of the  $F_2$  peak height ( $NmF_2$ ). By comparing with the Langmuir Probe measurements of CHAMP satellite (PLP), both agrees with  $1.6 \times 10^{11} \text{el/m}^3$  at the height of 365.6 km.

*Keywords:* APOD, KOMPSAT-5, GPS radio occultation, electron density profile

## 1. 서 론

엄폐(Occultation)는 달이나 목성과 같이 겉보기 크기가 큰 천체에 의해 행성이나 항성 등의 겉보기 크기가 작은 천체가 가려지는 현상을 지칭한다. 전파(radio)가 행성의 대기를 통과할 때 대기에서 굴절되어 신호 지연 현상을 일으키는 것 역시 전파 엄폐(Radio Occultation)라고 지칭한다.

고도 약 20,200km 상공의 GPS(Global Positioning System) 위성에서 고도 250~1,500km의 저궤도 위성에 전파되는 GPS 신호 역시 두 위성 사이의 기하학적 배치에 따라 지구 대기를 통과하는 과정에서 굴절현상을 겪게 된다. 이를 GPS 전파 엄폐라고 하며 굴절현상에 따른 L1(1.575GHz), L2(1.227GHz) 신호의 지연으로부터 계산되는 굴절률을 이용하여 지구대기의 온도, 압력, 수증기량 및 전리층 전자밀도의 연직 분포(vertical profile) 정보를 얻을 수 있다(Kursinski et al. 1997). 이러한 대기 물리량의 고도에 따른 정보는 전 지구적 또는 국지적인 기상예보, 기후 변화 감시, 대기 모델 및 전리층 모델 구축 등 다양한 분야에 활용되고 있다

전파 엄폐에 관한 연구는 1960년대 수행된 NASA의 행성탐사 프로그램들을 통해 지구와 마리너(Mariner) 우주선과의 전파 신호를 이용하여 행성의 대기구조를 연구하려는 시도에서 출발하였다. 1970년대 후반 GPS가 등장한 이후 JPL(Jet Propulsion Laboratory)은 저궤도 위성에서 수신되는 GPS 신호의 전파 엄폐를 이용한 지구 대기 연구를 제안하였다(Yunck & Melbourne 1989). 1990년대 중반 미국 UCAR(University Cooperation of Atmospheric Research)가 주도한 GPS/MET 프로그램의 GPS 전파 엄폐 관측에 의해서 대기의 온도 및 압력의 연직 분포가 정밀하게 산출되었다(Melbourne 1994). 그 후 GPS 전파 엄폐 자료를 수신하는 안테나를 탑재한 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload), SAC-C(Satélite de Aplicaciones Científicas-C), GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 등의 다양한 저궤도 위성에서 성공적으로 많은 자료를 수집하고 있으며 현재 이를 이용한 대류층 및 전리층에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. Wickert et al.(2001)은 CHAMP 위성의 GPS 전파 엄폐 자료를 사용하여 대류층 온도의 연직분포를 산출한 후 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 및 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 기상 분석 자료와 비교하여 고도 5km 이상에서 온도의 차이가 1K 이하로 일치함을 보였다. 또한 Jakowski & Tsybulya(2004)은 CHAMP 위성의 전리층 GPS 전파 엄폐 자료처리 결과와 IRI(International Reference Ionosphere) - 2001모델 결과와 비교하여 태양 활동 극대기일 때 IRI 모델의 보정 방안을 제시하였다.

이러한 연구 결과들을 토대로 대류층 및 전리층 연구 분야에 GPS 전파 엄폐 자료를 적극 활용

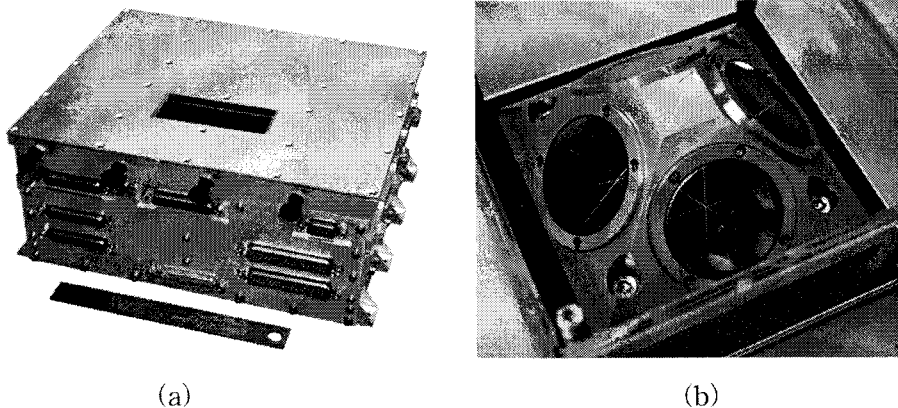


그림 1. (a) IGOR 이중 주파수 GPS 수신기, (b) 레이저 반사경.

하기 위하여 대만과 미국이 공동으로 2006년 4월 FORMOSAT-3 /COSMIC(이하 COSMIC) 위성을 발사하였다. COSMIC은 약 800km의 고도를 갖는 6개의 소형위성으로 구성되며 하루에 2500 여개의 GPS 전파 염폐 자료를 제공한다. COSMIC 프로그램에서 사용하는 GPS 전파 염폐 자료처리시스템은 전리층의 전자밀도 및 대류층의 온도와 압력 등의 연직 분포를 준 실시간으로 제공하고 있으며, 이 자료들은 전 지구 규모의 기상예보 및 기후감시, 전리층 연구 등에 활용 되고 있다. 우리나라도 2010년 발사 예정인 아리랑위성 5호에 위성탑재용 이중 주파수 GPS 수신기 및 GPS 전파 염폐 자료를 수신하는 안테나를 장착하는 것을 계기로 GPS 전파 염폐를 활용한 대류층과 전리층 연구가 시작되었다.

이 논문에서는 아리랑위성 5호에 탑재되는 AOPOD(Atmosphere Occultation and Precision Orbit Determination) 시스템을 소개하고 아리랑위성 5호에서 발생하는 GPS 전파 염폐의 발생 빈도 및 분포를 시뮬레이션 한다. 또한 현재 천문연구원에서 개발 중인 GPS 전파 염폐 자료처리시스템인 KROPS(KASI Radio Occultation Processing System)를 사용한 전리층 전자밀도 산출결과를 IRI-2001과 이온존데 및 CHAMP 위성의 랑뮈어 탐침기(PLP) 자료와 비교하여 KROPS의 전리층 GPS 전파 염폐 자료처리 알고리즘을 검증한다.

## 2. 아리랑위성 5호의 AOPOD 시스템

아리랑위성 5호 프로그램은 고정밀 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 획득을 주 임무로 하여 정밀 지도 제작, 자원 탐사 등의 광범위한 분야에 자료를 제공할 예정이다. 송수신된 SAR 신호로부터 영상을 합성하기 위해서는 위성의 위치 결정 정확도가 매우 높아야 하며 이를 위해 이중 주파수 GPS 수신기와 궤도 결정 감증을 위한 레이저 반사경을 장착할 예정이다. 아리랑위성 5호의 AOPOD 시스템은 위성탑재용 이중 주파수 GPS 수신기(그림 1a)와 SLR(Satellite Laser Ranging)용 레이저 반사경(그림 1b)으로 구성되며, 정밀궤도결정을 위한 자료를 수신하는 안테나와 GPS 전파 염폐 자료를 수신하는 안테나를 포함한다.

대표적인 위성 탑재용 이중주파수 GPS 수신기는 JPL에서 개발한 Blackjack 수신기로써 CHAMP

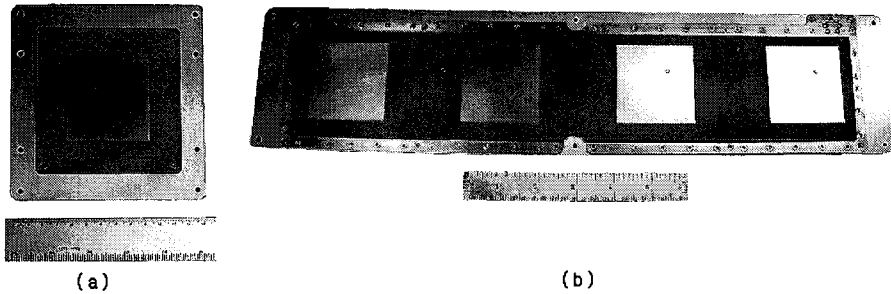


그림 2. (a) POD용 안테나(130 × 130 × 5mm), (b) GPS 전파 염폐용 안테나(105 × 455 × 6mm).

표 1. 아리랑위성 5호의 설계궤도요소(Epoch 2010/06/01 00:00:00 UTC).

평균궤도요소	값
궤도 장반경 (km)	6928.1
이심률	0.001
궤도 경사각 (deg)	97.6
승교점 적경 (deg)	339.5
근지점 이각 (deg)	90.0
평균 근점이각 (deg)	270.0

와 GRACE 등의 저궤도 위성 프로그램에 탑재되어 성능과 안정성이 검증되었다. AOPOD 시스템에서 사용하는 우주용 이중 주파수 GPS 수신기는 Broad-Reach Engineering 사의 IGOR(Integrated GPS Occultation Receiver)로서 JPL의 Blackjack 수신기를 바탕으로 개발되었으며, 현재 COSMIC 및 TerraSAR-X에 탑재되어 성공적으로 임무를 수행하고 있다. 그림 1b의 레이저 반사경은 프리즘 형태의 반사경을 특정 형태로 나열하여 구성한 것으로써 독일의 GFZ(GeoForschungsZentrum Potsdam)에서 제작한 4 corner cube 레이저 반사경이다. 그림 2a의 POD용 안테나는 130 × 130 × 5mm의 크기를 가지는 패치형 안테나로써 위성의 전정방향에 이중화(redundancy)를 위한 안테나를 포함하여 두개가 부착된다. 그림 2b의 GPS 전파 염폐용 안테나는 105 × 455 × 6mm의 패치형 배열 안테나로써 위성의 진행방향과 반 진행 방향에 부착되며 수평방향에서 약 23° 아래로 지구 대기의 가장자리(limb)를 지향한다.

아리랑위성 5호에서 발생하는 GPS 전파 염폐를 시뮬레이션 하기 위해 표 1에 제시한 아리랑위성 5호의 설계궤도요소(nominal orbit)와 GPS 전파 염폐 시뮬레이션 소프트웨어인 EGOPS(End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator) 4를 사용하였다(Kirchengast et al. 2003). EGOPS4에서는 GPS 위성과 저궤도 위성의 기하학적 배치를 이용하여 GPS 전파 염폐의 발생지점을 예측한다. 대기의 밀도가 지수함수형태로 감소하는 지수형 대기모델을 사용하여 GPS 위성과 저궤도 위성간 신호의 굴절효과를 고려하였으며 GPS 전파 염폐용 안테나는 위성의 진행방향과 반 진행방향에 부착한다고 가정하여 신호경로의 고도가 상승 및 하강하는 두 가지 상황에서 GPS 전파 염폐 자료를 얻게 하였다. 그림 3은 하루 동안 얻을 수 있는 아리랑위성 5호의 GPS 전파 염폐를 시뮬레이션 한 결과로써 약 500여개의 자료를 얻을 수 있는 것으로 계산되었다. 삼각형으로 표시된 부분이 아리랑위성 5호의 GPS 전파 염폐가 발생한 지점으로써 삼각형과 역삼각형은 각각 신호경로의 고도가 상승

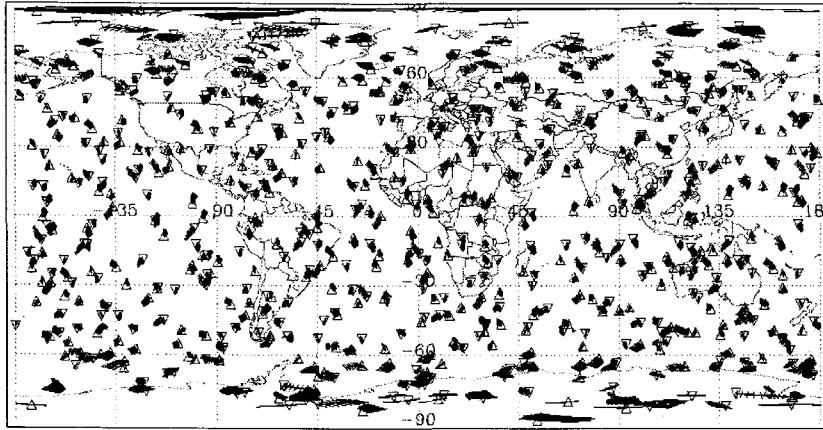


그림 3. 아리랑위성 5호에서 하루 동안 획득할 수 있는 GPS 전파 엄폐 발생 분포도.

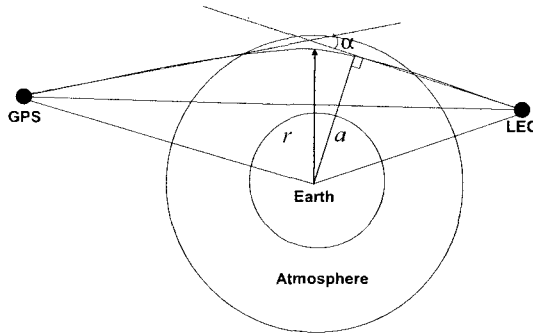


그림 4. GPS 전파 엄폐 개념도.

및 하강하는 것을 나타내며 삼각형 안의 검은 색으로 된 부분은 발생한 GPS 전파 엄폐의 경로이다.

### 3. GPS 전파 엄폐의 원리

그림 4는 GPS 전파 엄폐의 개념도이다. 대기에 의한 굴절 정도는 신호경로의 휘어진 정도, 즉 휨각(bending angle)으로 측정되는데 휨각은 그림 4에서  $\alpha$ 로 표시한다. GPS 전파 엄폐가 구 대칭이며 층화된 대기(stratified atmosphere)를 통과한다고 가정하면 일반적으로 각  $\alpha$ 는 신호방향의 수직방향 성분인  $a$ (impact parameter)와 굴절현상의 중심에서 휘어진 곡선까지의 거리  $\gamma$ (tangent radius), 그리고 대기굴절지수  $n$ (atmospheric refraction index)을 사용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Kursinski et al. 1997, Hajj et al. 2002). 여기서 수평방향의 밀도변화는 수직방향의 밀도 변화에 비해 충분히 작다고 가정한다.

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_t}^{\infty} d\alpha = 2\alpha \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (1)$$

식 (1)은 Abel 역산방법에 의해 식 (2)와 같이 대기굴절지수  $n(r)$ 에 관한 식으로 정리된다(Fjeldbo et

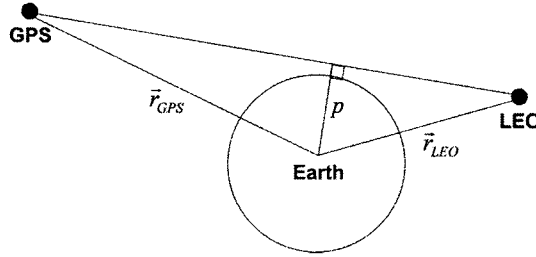


그림 5. 전리층 전자밀도를 산출하기 위한 GPS 위성과 저궤도 위성의 기하학적 배치.

al. 1971, Hajj et al. 2002).

$$n(r) = \text{Exp} \left[ \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right] \tag{2}$$

여기서  $a_1 = nr$ 이다.

이와 같이 휩각으로부터 구해진 대기굴절지수로부터 이상기체상태 방정식 및 정역학평형을 사용하여 중성대기의 온도, 압력 등이 도출된다(Kursinski et al. 1997). 전리층의 경우 도출된 굴절지수로부터 전자밀도를 계산할 수 있다. 식 (3)은 굴절지수와 전자밀도  $N$ 의 관계식이다.

$$n^2 - 1 = 80.6 \times 10N/f^2 \tag{3}$$

여기서  $n$ 은 굴절지수(refractive index),  $N$ 은 전자밀도( $\text{el}/\text{m}^3$ ),  $f$ 는 반송파 주파수(Hz)이다.

GPS 전파 임계 자료로부터 전자밀도의 연직분포를 산출하기 위해서는 두 가지 방법을 사용할 수 있다. 첫 번째는 앞서 언급한 휩각으로부터 도출한 굴절률을 전자밀도로 변환시키는 방법이고, 두 번째는 전리층 총 전자수(TEC; Total Electron Content)를 계산하여 전자밀도를 산출하는 방법이다. 특히 관측값인 L1과 L2 반송파의 신호 지연량(atmospheric excess phase) 차이로부터 계산한 TEC를 사용하면 위성궤도추정 정밀도에 따른 오차 및 GPS 수신기의 시계오차를 제거할 수 있기 때문에 자료처리 시간을 줄일 수 있어 준 실시간 자료처리가 가능하다(Schreiner et al. 1999). 따라서 이 논문에서는 TEC를 이용하여 전자밀도를 산출하기로 한다.

TEC를 이용하여 전자밀도를 산출하기 위해서는 그림 5와 같이 GPS 위성에서부터 저궤도 위성이 수신하는 신호의 경로를 직선으로 가정한다. L1과 L2 반송파에 대한 신호 지연량으로부터 TEC를 구하기 위해서는 식 (4)를 사용한다(Schreiner et al. 1999).

$$T = -\frac{S_1 f_1^2}{40.3} = -\frac{S_2 f_2^2}{40.3} = \frac{(S_1 - S_2) f_1 f_2}{40.3(f_1 - f_2)} \tag{4}$$

여기서  $T$ 는 TEC( $\text{el}/\text{m}^3$ )이고  $S_1$ 과  $S_2$ 는 각각 L1, L2 반송파의 신호 지연량, 그리고  $f_1$ 과  $f_2$ 는 L1, L2 반송파의 주파수이다.

실제 GPS 위성에서 수신되는 신호를 사용하여 계산한 TEC는 저궤도 위성고도 이상의 신호 지연량까지 포함하므로 GPS 위성에서 저궤도 위성까지 도달하는 신호에 대한 TEC을 빼준 후 전자밀도 산출에 사용하며 이를 보정 TEC(calibrated TEC)라고 한다. 보정 TEC과 전자밀도의 관계는 식 (5)와 같다.

$$\tilde{T}(p) = 2 \int_p^{p_{top}} \frac{rN(r)}{\sqrt{r^2 - p^2}} dr \tag{5}$$

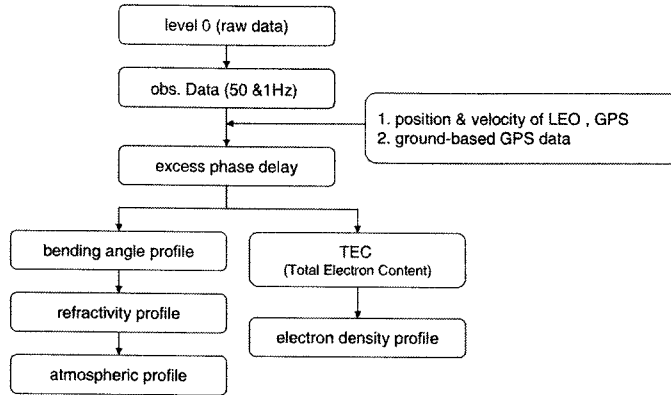


그림 6. KROPS의 GPS 전파 임페 자료처리 흐름도.

여기서  $\tilde{T}$ 는 보정 TEC이고  $p$ 는 지구 중심에서 직선으로 가정한 신호경로까지의 수직거리이며  $p_{top}$ 은 저궤도 위성의 고도( $r_{LEO}$ )와 같다.

식 (5)를 역산하여 얻어지는 식 (6)을 통해 고도에 따른 전자밀도를 얻을 수 있다.

$$N(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_{LEO}} \frac{d\tilde{T}/dp}{\sqrt{p^2 - r^2}} dp \quad (6)$$

그러나 식 (6)을 적분하는 과정에서 경계부근의 특이점이 발생하므로 Syndergaard et al.(2005)은 보정 TEC와 전자밀도의 관계를 식 (7)과 같이  $m$ 개의 고도에 따른 층을 가지는 적분의 합으로 나타냈다.

$$\tilde{T}(p_i) = \sum_{k=1}^m 2 \int_{p_{i+k-1}}^{p_{i+k}} \frac{rN(r)dr}{\sqrt{r^2 - p_i^2}} \quad (7)$$

$N(r)$ 이 선형적으로 변한다고 가정하면 식 (7)은 식 (8)과 같은 해석적 해를 갖는다.

$$N(p_i) = c_{i,0}^{-1} \left( \frac{\tilde{T}(p_i)}{p(i)} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} N(p_{i+k}) \right) \quad (8)$$

여기서 계수  $c_{i,0}$ 와  $c_{i,k}$ 는 아래와 같다(Lei et al. 2007).

$$\begin{aligned} \epsilon_k &= (p_{i+k} - p_i)/p_i \\ c_{i,0} &= \epsilon_1^{-1} \left[ (1 + \epsilon_1) \sqrt{\epsilon_1(2 + \epsilon_1)} - \ln(1 + \epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1(2 + \epsilon_1)}) \right] \\ c_{i,k} &= (\epsilon_{k+1} - \epsilon_k)^{-1} \left[ (1 + \epsilon_{k+1})(\sqrt{\epsilon_{k+1}(2 + \epsilon_{k+1})} - \sqrt{\epsilon_k(2 + \epsilon_k)}) - \ln\left(\frac{1 + \epsilon_{k+1} + \sqrt{\epsilon_{k+1}(2 + \epsilon_{k+1})}}{1 + \epsilon_k + \sqrt{\epsilon_k(2 + \epsilon_k)}}\right) \right] \\ &\quad - (\epsilon_k - \epsilon_{k-1})^{-1} \left[ (1 + \epsilon_{k-1})(\sqrt{\epsilon_k(2 + \epsilon_k)} - \sqrt{\epsilon_{k-1}(2 + \epsilon_{k-1})}) - \ln\left(\frac{1 + \epsilon_k + \sqrt{\epsilon_k(2 + \epsilon_k)}}{1 + \epsilon_{k-1} + \sqrt{\epsilon_{k-1}(2 + \epsilon_{k-1})}}\right) \right] \end{aligned}$$

$$\tilde{T}(p) \approx 2N(p_{top})\sqrt{2p_{top}(p_{top} - p)} \quad (9)$$

$N(r_{LEO}) \equiv N(p_{top})$ 이라고 하면 식 (9)의 관계식으로부터 선형회귀분석을 통해  $N(p_{top})$ 을 구한 후 식 (8)에 따라 순차적으로 다음 고도에서의 전자밀도인  $N(r)$ 을 구할 수 있다.

표 2. KROPS에서 제공하는 자료 및 산출물.

레벨	내용
레벨 0	AOPOD 시스템의 위성수신자료(raw data)
레벨 1a	RINEX 형태의 GPS 전파 엄폐 관측자료
레벨 1b	대기에 의한 신호지연량(atmospheric excess phase) GPS 전파 엄폐 자료에 대한 시간 및 위치정보(occultation table)
레벨 2	온도, 압력 및 습도의 연직분포도(대류층) 전자밀도의 연직분포도(전리층)

#### 4. GPS 전파 엄폐 자료처리 결과

현재 한국천문연구원에서 개발하고 있는 GPS 전파 엄폐 자료처리시스템인 KROPS의 전리층 전자밀도 산출 알고리즘을 검증하기 위해 CHAMP 위성의 전리층 GPS 전파 엄폐 관측값을 사용하여 전자밀도의 연직분포를 산출하였다. 고도 450km의 CHAMP 위성은 독일의 GFZ와 미국 NASA JPL이 협력한 저궤도 위성 프로그램으로써 중력, 지구자기장 및 지구대기 연구를 위한 자료를 제공하고 있다. 특히 CHAMP 위성에 실린 위성탑재용 이중 주파수 GPS 수신기인 BlackJack과 GPS 전파 엄폐 수신 안테나로부터 얻는 자료들은 GPS/MET 프로그램 이후 GPS 전파 엄폐에 관한 응용연구를 본격적으로 시작하게 되는 계기가 되었다. CHAMP 위성은 발사 후 8년이 지난 현재까지 자료를 제공함에 따라 GPS 전파 엄폐를 사용한 기후 변화 감시 연구 및 자료 처리 알고리즘 테스트를 위해 많이 사용되고 있다.

KROPS는 GPS 전파 엄폐 관측값으로부터 대류층 및 전리층 물리량의 연직분포를 산출하는 프로그램으로써 대류층의 경우 50Hz 즉, 0.02초 간격의 GPS 전파 엄폐 자료를 사용하여 온도, 기압 및 습도의 연직분포를 제공하고, 전리층의 경우 1Hz, 즉 1초 간격의 GPS 전파 엄폐 자료를 사용하여 전자밀도의 연직분포를 제공할 예정이다. 위성에서 수신된 GPS 전파 엄폐 관측 자료(레벨 0)는 RINEX 형태로 변환되어(레벨 1a) 이로부터 대기에 의한 신호 지연량(atmospheric excess phase)을 도출한다(레벨 1b). 대류층의 경우 대기에 의한 신호 지연량으로부터 휘각, 굴절률 및 온도와 압력 등의 대기물리량이 산출되며 전리층의 경우 대기에 의한 신호 지연량으로부터 TEC를 계산하여 전자밀도를 산출한다(레벨 2). 그림 6은 KROPS의 자료처리 흐름도이고 KROPS에서 제공하는 자료 및 산출물을 표 2에 정리하였다.

GPS 전파 엄폐 관측 자료로부터 대기에 의한 신호 지연량을 도출할 때 발생하는 오차가 전자밀도 산출 알고리즘 검증 과정에 미치는 영향을 배제하기 위해 이 연구에서는 독일의 GFZ에서 제공하는 CHAMP 위성의 레벨 2 자료를 입력값으로 사용하였다. CHAMP 위성은 레벨 0에서 3까지의 자료를 제공하며 레벨 2 자료는 GPS 전파 엄폐가 발생한 시각, 고도, 위치(위도, 경도)와 저궤도 위성 및 GPS 위성의 위치, 그리고 대기에 의한 신호 지연량을 포함하고 있다.

결과 검증을 위해 태양활동( $F10.7 = 123.0$ ) 및 지자기 활동( $Kp \sim 1$ )이 같은 조건 하에 각기 다른 시간 및 장소에서 발생한 GPS 전파 엄폐 자료를 사용하여 전자밀도 연직분포를 생성한 후 전리층 모델인 IRI-2001 및 CHAMP 위성의 PLP(Planar Langmuir Probe) 관측값과 비교하였다. PLP는 위성에 탑재되어 위성고도에서의 전자밀도 관측값(in-situ measurements)을 제공한다. IRI 모델은 전 세계에서 획득한 전리층 관측값을 토대로 작성된 경험적 전리층 모델로써 위도와 경도 및 고도에 따른 전자 밀도를 제공한다.



표 3. GPS 전파 엄폐 자료 정보.

GPS PRN 번호	발생시간 (UT)	지속 시간 (sec)	발생지점의 경도 (deg)	발생지점의 위도 (deg)
9	00:12	297	50.3	46.3
31	06:41	340	132.1	50.9
10	12:45	472	20.2	61.6
8	18:49	312	334.7	82.8

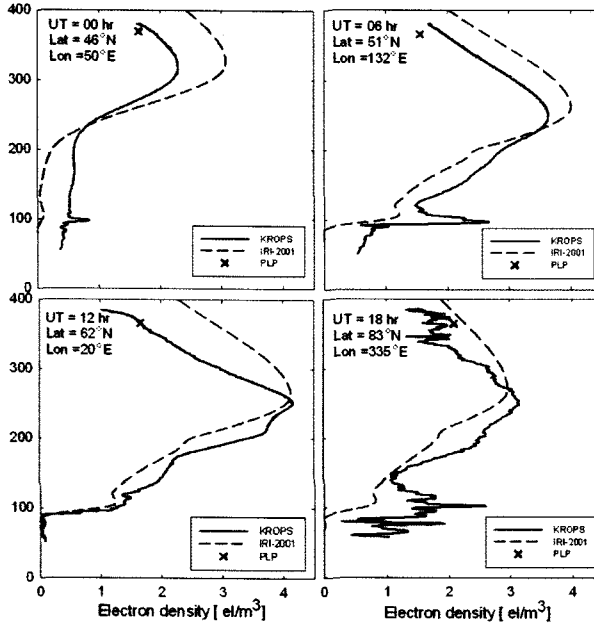


그림 7. 2004년 6월 20일 발생한 CHAMP 위성의 GPS 전파 엄폐 자료를 사용한 KROPS의 전자밀도의 연직분포와 IRI-2001 모델 및 PLP 관측값의 비교.

지자기 활동변화가 거의 일정한 2004년 6월 20일에 발생한 전리층 GPS 전파 엄폐 중 UT 00시, 06시, 12시, 18시 부근의 자료를 사용하여 KROPS의 알고리즘을 통해 전자밀도의 연직분포를 산출하였다. 표 3은 자료처리에 사용한 CHAMP 레벨 2 자료의 특성이며 그림 7은 표 3의 자료를 사용하여 KROPS로부터 산출한 전자 밀도의 연직분포이다. 실선이 KROPS의 결과이고 점선이 IRI-2001 모델 값, 그리고 X표가 PLP 관측값이다. 표 4는 KROPS 결과와 IRI-2001 모델 값에 따른  $hmF_2$ 와  $NmF_2$ 이다.  $F_2$ 층의 최대전자밀도 고도인  $hmF_2$ 는 두 경우 모두 약 250~300km 사이에서 나타나고 있으며 각 시간에 해당하는 두 경우의  $hmF_2$ 의 차이는 UT 18시를 제외한 결과에서 6~8km 내외로 일치함을 볼 수 있다.  $F_2$ 층의 최대전자밀도인  $NmF_2$ 의 경우 UT 00시와 06시, 18시에서 각각  $7 \times 10^{10} \text{el/m}^3$ ,  $4 \times 10^{10} \text{el/m}^3$ ,  $2 \times 10^{10} \text{el/m}^3$ 의 차이를 보이고 UT 12시의  $NmF_2$ 는 일치한다. 전리층 최상부 지역(ionospheric top side)의 전자밀도와 PLP 값을 비교했을 때 UT 12시에는 매우 잘 일치하였으며 그 외의 결과에서는  $0.4 \times 10^{11} \text{el/m}^3$  이내의 차이를 보여준다(그림 7). KROPS의 결과가 IRI-2001 모델 값 보다 PLP 에 훨씬 근접한 값을 가진다.

표 4. 시간별 KROPS와 IRI-2001 결과에 따른 hmF<sub>2</sub>와 NmF<sub>2</sub>.

시간 (UT)	발생장소 (위·경도)	hmF <sub>2</sub> (km) (KROPS / IRI-2001)	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>11</sup> el/m <sup>3</sup> ) (KROPS / IRI-2001)
00 hr	46.3°N 50.3°E	322.8 / 330.0	2.3 / 3.0
06 hr	50.9°N 132.1°E	252.3 / 260.0	3.6 / 4.0
12 hr	61.6°N 20.2°E	254.5 / 260.0	4.1 / 4.1
18 hr	82.8°N 334.7°E	247.3 / 270.0	3.1 / 2.9

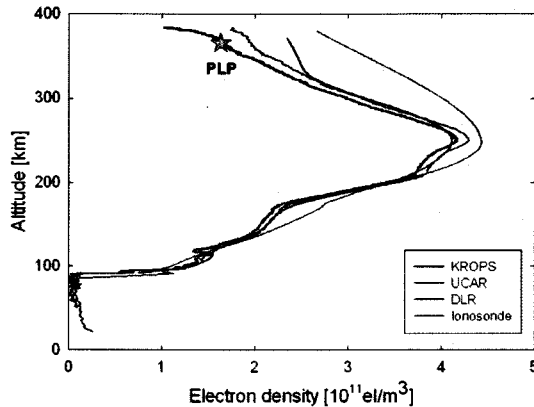


그림 8. KROPS가 산출한 결과와 UCAR 및 DLR의 자료처리결과, 그리고 PLP 및 이온존데 관측값과의 비교.

고도 100km 부근에서 정상적인 전자밀도보다 급격히 증감하는 Sporadic-E 층이 발생한 것을 볼 수 있으며 특히 UT 18시 부근의 자료를 사용하여 산출한 KROPS의 전자밀도의 연직분포는 고위도 전리층의 교란된 모습을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 고위도 대기권은 중·저위도와는 달리 매우 복잡한 양상을 보이지만 지리적 한계성으로 인해 지상 장비를 이용한 관측이 쉽지 않기 때문에 지상 관측 자료를 주요 토대로 한 IRI-2001 모델은 고위도 지역의 복잡한 전자 밀도 변화를 반영하지 못하고 있다. 그러므로 GPS 전파 엄폐 관측은 지상관측장비 설치가 어렵고 물리적 과정이 복잡한 남북극 고위도 지역의 전리층 및 대기권 감시에 특히 유용하리라 생각된다. 또한 hmF<sub>2</sub>를 기준으로 그 이상의 고도에서는 IRI-2001이 더 높은 전자밀도를 갖고 그 이하의 고도에서는 반대로 낮은 전자밀도를 갖는 양상을 보임에 따라 GPS 전파 엄폐 관측 자료는 IRI 모델 개선에도 사용될 수 있을 것으로 보인다.

표 3의 GPS 전파 엄폐 자료 중 지상관측 장비인 이온존데(Lat = 54.6°N, Lon = 13.4°E)와 위치적으로 근접한 UT 12시 자료를 사용하여 결과를 비교하였다(그림 8). 이와 함께 UCAR와 CHAMP 위성의 전리층 자료처리를 담당하는 DLR(German Aerospace Center) Neustrelitz에서 동일한 CHAMP 자료를 사용하여 처리한 결과를 함께 비교하였다. 검은 선으로 표시된 그래프가 KROPS의 결과이고 빨간 선과 파란 선은 각각 UCAR와 DLR Neustrelitz에서 산출한 전리층 전자밀도 분포 결과이다. 녹색 선은 이온존데 관측값을 나타내며 하늘색 별표는 PLP 관측값이다.

KROPS 결과의 경우 위성의 고도 근처인 350km 이상에서는 약 100~300m의 수직 해상도를 가지며 그 이하의 고도에서는 약 1km의 수직 해상도를 갖는다. 이는 신호의 경로가 지표에 가까워짐에

표 5. GPS 전파 염폐 자료처리 결과 및 이온층대의 hmF<sub>2</sub>와 NmF<sub>2</sub>.

분류	hmF <sub>2</sub> (km)	NmF <sub>2</sub> (10 <sup>11</sup> el/m <sup>3</sup> )
KROPS	251.8	4.1
UCAR	250.9	4.2
DRL Neustrelitz	254.7	4.1
이온층대	246.8	4.4

따라 위성의 위치가 상대적으로 급격하게 변하기 때문이며 추후 최종 산출물 제공과정에서 수직 해상도를 조절 할 수 있다. UCAR의 경우 전 고도에서 약 1km의 수직 해상도로 결과를 제공하고 있다.

KROPS와 UCAR, DLR 모두 hmF<sub>2</sub> 아래 부분에서는 거의 일치하는 경향을 보이고 F<sub>2</sub>층의 최대전자밀도 NmF<sub>2</sub>는 KROPS와 DLR의 경우 거의 일치하나 UCAR는 좀더 큰 값을 갖는다. PLP 값과의 비교에서는 KROPS의 결과가 가장 잘 일치함을 보여준다. 이온층대의 경우 100~200km 사이의 값은 어느 정도 일치함을 보인다. 그러나 이온층대의 관측 특성상 200km 이상의 값은 관측결과를 외삽한 값으로써 신뢰성이 떨어지기 때문에 특히 hmF<sub>2</sub> 이상의 고도에 대한 KROPS 결과 검증을 위해서는 비간섭 산란 레이더(Incoherent Scatter Radar)와 같은 정밀한 전자밀도 관측 자료와의 비교가 요구된다. 표 5에 각각의 결과에 대한 hmF<sub>2</sub> 및 NmF<sub>2</sub>를 비교하였다. GPS 전파 염폐 관측값을 사용하여 전자밀도를 산출한 KROPS 및 UCAR와 DLR의 경우 hmF<sub>2</sub>는 250~254km, NmF<sub>2</sub>는  $4.1 - 4.2 \times 10^{11} \text{el/m}^3$  값을 보이나, 이온층대의 경우 hmF<sub>2</sub>는 다소 낮은 246.8km을, NmF<sub>2</sub>는 보다 높은  $4.4 \times 10^{11} \text{el/m}^3$  값을 보인다.

## 5. 결론 및 향후 계획

2010년에 발사에정인 아리랑위성 5호의 AOPOD 시스템에서 얻게 되는 GPS 전파 염폐 자료는 전 지구적 범위의 대류층 및 전리층 물리량의 연직분포를 제공할 수 있다. 특히 전리층에서 발생하는 GPS 전파 염폐는 비간섭 산란 레이더나 이온층대 등 다른 지상 관측 장비에 비해 남북극을 포함하여 전 세계적으로 골고루 분포된 많은 양의 전자밀도 연직분포도를 비교적 적은 비용으로 제공한다는 점에서 전리층 연구 분야에서 활발한 사용이 기대된다.

이 논문에서는 아리랑위성 5호의 GPS 전파 염폐 자료처리시스템인 KROPS 개발의 일환으로 전리층 GPS 전파 염폐 관측값을 사용하여 전리층 전자밀도의 연직분포를 산출하고 IRI-2001 모델과 지상관측 장비인 이온층대 및 CHAMP 위성에 탑재된 PLP 관측값을 사용하여 결과를 비교하였다. CHAMP 위성의 레벨 2 자료인 전리층에 의한 신호지연량을 사용하여 TEC을 계산한 후 전자밀도에 관한 식으로 변환하여 고도에 따른 전자밀도 값을 산출하였다. KROPS의 결과를 IRI-2001 모델 값과 비교할 때 hmF<sub>2</sub>는 6-8km, NmF<sub>2</sub>는  $1 \times 10^{11} \text{el/m}^3$  이내의 차이를 보였다. PLP 값과 비교 할 때 KROPS의 결과는 IRI-2001 모델값보다 훨씬 근접한 전자밀도 값을 보여주었다. GPS 전파 염폐 관측값을 사용하여 KROPS 및 UCAR와 DLR에서 산출한 결과를 이온층대와 비교할 때 hmF<sub>2</sub>는 각각 5km, 4.1km, 7.9km 높게 나타나며 NmF<sub>2</sub>의 경우 이온층대값이 약  $3 \times 10^{10} \text{el/m}^3$  높게 나타났다. hmF<sub>2</sub> 이상의 고도에서는 각 결과별로 전자밀도의 차이를 보이나 KROPS의 결과가 위성고도의 전자밀도 관측값(in-situ measurements)인 PLP값에 가장 부합한 것으로 나타났다(그림 8).

향후 GPS 전파 염폐 자료처리 프로그램인 KROPS는 전지구적 대류층 및 전리층 물리량에 대한

고해상도의 연직분포를 제공하기 위하여 타기관의 결과뿐 만 아니라 지상 관측 값과의 비교를 통해 결과를 검증하고 보정해 나가는 작업을 수행할 예정이다. 특히 전리층의 경우 가장 정확한 전자밀도의 연직분포를 제공하는 것으로 알려진 비간섭 산란 레이더와의 비교작업이 요구되지만 비간섭 산란 레이더 기저국의 희소성으로 인해 충분한 검증을 위해서는 이온존데 및 지상 GPS 자료와의 연계성을 토대로 태양 활동 극대기 및 지자기 폭풍시 자료를 포함하여 산출한 결과 검증이 요구된다. 이를 통해 KROPS에서 산출한 대기 물리량의 연직분포는 GPS 전파 임폐 관련 다른 우주 프로그램들에서 얻을 수 있는 결과들과 연계하여 대류층 및 전리층 연구 분야에 기여할 것으로 기대한다.

**감사의 글:** 이 연구는 다목적실용위성 5호 개발사업 중 “SAR 위성의 TOR을 이용한 SAR 데이터 오차 보정 시스템 개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 자료처리를 위한 CHAMP RO와 랑뮈어 탐침기 자료 및 좋은 연구 환경을 제공해주신 GFZ의 Dr. Jens Wickert에게도 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고문헌

- Fjeldbo, G., Kloire, A. J., & Eshleman, V. R. 1971, *Astro. J.*, 76, 123
- Hajj, G. A., Kursinski, E. R., Ramans, L. J., Bertiger, W. I., & Leroy, S. S. 2002, *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 451
- Jakowski, M. & Tsybulya, T. 2004, *Advances in Radio Science*, 2, 275
- Kirchengast, G., Fritzer, J., & Ramsauer, J. 2003, *IGAM/UG Technical Report for ESA/ESTEC*, No.2/2003 (EGOPS4 Software User Manual)
- Kursinski, E. R., Hajj, G. A., Schofield, J. T., Linfield, R. P., & Hardy, K. R. 1997, *JGR*, 102, 23429
- Lei, J., Syndergaard, S., Burns, A. G., Solomon, S. C., Wang, W., Zengm, Z., Roble, R. G., Wu, Q., Kuo, Y.-H., Holt, J. M., Zhang, S.-R., Hysell, D. L., Rodrigues, G. S., & Lin, C. H. 2007, *JGR*, 112, A07308
- Melbourne, W. G. 1994, *NASA Technical Report (The application of space-borne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring)*, JPL Pub. 94-18
- Schreiner, W. S., Sokolovsky, S. V., Rocken, C., & Hunt, D. C. 1999, *Radio Sci.*, 34, 949
- Syndergaard, S., Kursinski, E. R., Herman, B. M., Lane, E. M., & Flittner, D. E. 2005, *Monthly Weather Review*, 133, 2650
- Wickert, J., Reigber, Ch., Beyerle, G., Konig, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T., Melbourne, W., & Hocke, K. 2001, *GRL*, 28, 3263
- Yunck, T. & Melbourne, W. 1989, in *GPS and other radio tracking system*, eds. Y. Bock & N. Leppard (New York: Springer-Verlag)