

GPS를 이용한 전리층 토모그래피 모델 개발

최병규^{1,2†}, 박종욱¹, 이상정²

¹한국천문연구원 우주측지연구그룹

²충남대학교 전자공학과

DEVELOPMENT OF IONOSPHERIC TOMOGRAPHY MODEL USING GPS

Byung-Kyu Choi^{1,2†}, Jong-Uk Park¹, and Sang-Jeong Lee²

¹Space Geodesy Research Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Department of Electronics Engineering, ChungNam National University, Daejon 305-764, Korea

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

(Received June 12, 2006; Accepted August 21, 2006)

요약

한국천문연구원에서 운영중인 9개의 GPS(Global Positioning System) 상시관측소 데이터를 이용하여 한반도 상공의 고도에 따른 전리층 내의 전자밀도 분포를 산출하였다. 전리층의 전자밀도를 정밀하게 추정하기 위해 이중주파수(L1,L2) 데이터가 사용되었고, 2차원 총전자수(Total Electron Contents, TEC) 값을 기반으로 정밀한 전자밀도 분포를 얻을 수 있었다. 그리고 토모그래피 모델개발에 널리 사용되고 있는 Inversion 기법 중의 하나인 ART(Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘을 적용하였다. 본 연구에서는 지역적 GPS 관측망을 활용하여 시간에 따른 한반도 상공의 전자밀도 분포 유형을 제시하였고, GPS에 의한 전리층 재구성으로 얻어진 전자밀도 유형을 경험적 모델인 IRI-2001에 의해 계산된 값과 관측으로부터 얻어진 Ionosonde 관측값을 서로 비교하였다. 그 결과 GPS 재구성에 의한 전자밀도 분포 유형이 Ionosonde에 의한 관측값과 잘 일치하는 경향을 보였다.

ABSTRACT

We produced the electron density distribution in the ionosphere over South Korea using the data from nine permanent GPS (Global Positioning System) stations which have been operated by KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute). The dual-frequency GPS receiver data was used to precisely estimate the electron density in the ionosphere and we obtained the precise electron density profile based on two-dimensional TEC (Total Electron Contents). We applied ART (Algebraic Reconstruction Technique), which is one of the most commonly used algorithms to develop the tomography model. This paper presented the electron density distribution over South Korea with time. We compared with the electron density profiles derived from the GPS tomography reconstruction, Ionosonde measurement data obtained by observations, and the IRI-2001 values. As a result, the electron density profile by GPS reconstruction was in excellent agreement with the electron density profile obtained by Ionosonde measurement data.

†corresponding author

Keywords: ionosphere, GPS, total electron content, space weather

1. 서 론

1990년대부터 GPS를 이용한 전리층 기반 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 광역 또는 지역적인 GPS 기준국망을 이용한 정밀한 2차원 전리층 총전자수(Total Electron Contents, TEC) 결정과 고도에 따른 전리층내의 전자 분포 감시에 많은 초점을 맞추고 있다(Komjathy 1997, Skone 1998, Liao 2000, Fedrizzi et al. 2001). 또한 급격한 우주환경변화로 인한 자국의 위성체 보호 및 원활한 임무 수행을 위해 위성 상주 공간(500 ~ 800km 이내)에 대한 중요성이 증가하고 있는 추세이다(Pryse et al. 1995).

전리층은 그곳을 통과하는 신호, 즉 전자기적 성질을 갖는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 신호를 지연시키거나 앞섬(Advanced) 현상을 일으킨다. 그리고 이러한 전리층의 영향은 앞서 설명한 우주환경과 밀접한 관련이 있으며, GNSS를 활용하는 측위정보 서비스의 정확도를 저하시킨다. GPS를 이용한 전리층 연구는 지역적인 것보다는 국제공동연구에 관심이 더욱 집중되고 있으며, 이전에 후처리로 진행되었던 많은 연구들이 현재는 실시간 활용분야에 널리 응용되고 있다. 대표적인 전리층 연구 분야로는 전세계 200여개의 IGS 기준국 데이터를 이용하여 하루 단위 또는 매 15분 간격으로 수직방향 총전자수(Vertical TEC, VTEC)를 산출하는 전지구적 전리층 모델(Global Ionosphere Maps, GIM), 지상 레이더와 Ionosonde를 이용하여 고도에 따른 전자 밀도분포를 감시하는 시스템, 그리고 GPS와 저궤도 위성을 이용하여 상충대기의 특성을 분석하는 GPS Radio Occultation 등을 들 수 있다.

본 연구에서 제시하고자 하는 GPS를 이용한 전리층 토모그래피(Tomography) 기법은 고도에 따른 전자 밀도 분포를 ART(Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘을 이용하여 재구성하는 것이다. 일반적으로 토모그래피는 의학이나 지하자원 분포조사 등의 분야에서 광범위하게 사용되는 기법이다. 전리층 토모그래피는 1988년에 처음으로 소개되었으며(Austen et al. 1988), 점점 더 향상된 알고리즘이 개발되고 있다.

2. 기저 함수(Basis Function)

기저 함수의 선택은 전리층을 어떤 방식으로 모델링 할 것인지를 결정한다. 고도에 따른 전리층의 전자밀도 분포 추정을 위해 가상의 공간은 pixel 또는 voxel (volume pixel)로 나타낼 수 있다(Mequet 2004). 그리고 기저 함수는 다음 식 (1)과 같은 형태를 갖는다.

$$D(\phi, h) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 GPS 신호가 가상의 공간으로 나누어진 pixel을 통과하면 그 pixel은 1의 값을 갖게 되고, 그렇지 않으면 0이 된다. 이에 대한 자세한 도식적인 것은 그림 1을 통해 볼 수 있다. 그림 1은 한국천문연구원에 의해 운영하는 9개의 GPS 상시관측소에서 한번의 관측시간(Epoch)에 관측된 GPS 신호들이 pixel을 통과하는 경로를 나타낸 것이다. 임의의 GPS 신호가 미리 정해놓은 고도(100~1,000km)를 통과할 때, 각각의 고도와 위도(50km × 1° 간격)에 따른 신호통과 지점은 작은 원으로 표시된다. pixel의 구성은 전리층 모델링 전략에 따라 다르며, pixel을 작게 나누면 전체적인 자료 계산양이 많

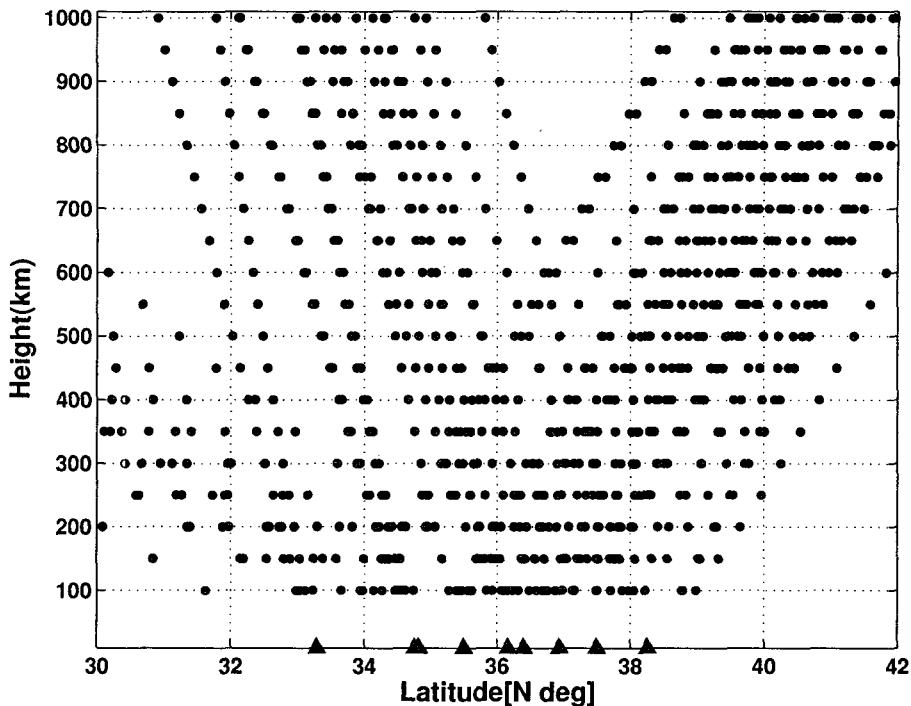


그림 1. 위도와 고도에 따른 격자를 통과하는 GPS 신호들.

아져 자료처리 시간이 길어지는 단점이 있는 반면, 정밀한 전리층의 전자 분포를 추정할 수 있는 장점이 있다.

3. GPS에 의한 전리층 재구성 방법

재구성 방법에는 기본적으로 두 가지 형태가 있다. 첫 번째는 픽셀(pixel)기반 방법으로 불리는 대수학 방정식을 사용하는 것이고, 나머지 하나는 프리에 변환(Fourier Transform) 방법을 사용하는 것이다. 일반적으로 전리층 토모그래피 2차원 모형은 고도와 위도 또는 고도와 경도를 격자 형태에 기반을 둔다. 본 연구에서는 그림 1처럼 고도는 100km에서 1,000km 그리고 위도는 31N°에서 40N°로 격자를 구성하였다.

전자 밀도는 GPS 신호가 통과한 각 pixel 내에서 모두 일정하다고 가정하고, GPS 신호가 pixel을 통과하면 총전자수는 통과한 pixel 내의 전자 밀도 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$STEC_i = \sum_{j=1}^M n_j d_{ij} + e_j \quad (2)$$

여기에서 시선방향 총전자수 $STEC_i$ 와 기저함수 d_{ij} 는 GPS에 의해 계산되는 값이기 때문에 GPS 신호가 통과한 각 pixel 내의 n_j (전자 밀도)를 역으로 계산할 수 있다. 그리고 e_j 는 시스템 오차를 나타낸다. 일반적으로 전리층 토모그래피 모델 개발에 사용되는 Inversion 기법중의 하나가 ART이

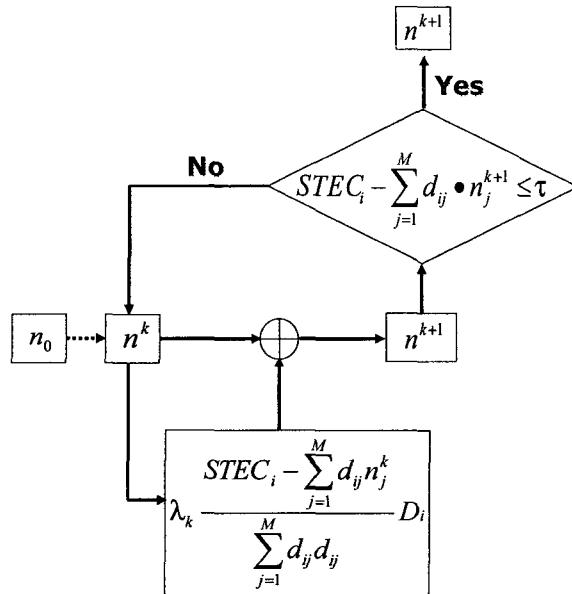


그림 2. ART 알고리즘.

다(Sutton & Na 1996). ART 알고리즘(식 (3))은 다른 재구성 알고리즘과 비교해서 반복적인 기법을 사용하여 빠르게 수렴하는 장점을 갖고 있기 때문에 널리 사용되고 있다. 하지만 이 방법은 초기값을 필요로 하고, 초기값에 따라 수렴 속도가 많이 달라지는 단점을 또한 갖고 있다.

$$n^{k+1} = n^k + \lambda_k \frac{STEC_i - \sum_{j=1}^M d_{ij} n_j^k}{\sum_{j=1}^M d_{ij} d_{ij}} D_i \quad (3)$$

식 (3)에서 n 은 ART 알고리즘의 연속적 계산에 의해 보완되는 각 pixel 내의 전자 개수를 의미하고, k 는 알고리즘의 반복을 의미하며 본 연구에서는 최대 20번까지 가능하도록 설정하였다. 여기에서 D_i 는 d_{ij} 를 통합적으로 재구성한 행렬이다. λ_k 는 Relaxation parameter이고, 이 값은 본 연구에서 $0 < \lambda_k < 2$ 의 범위를 갖는 실수 값으로 설정이 되었다. 초기에는 $\lambda_k = 0.005$ 값으로 반복을 시도한다(Yizengaw et al. 2004). 그리고 λ_k 는 반복이 진행됨에 위의 범위 내에서 값이 증가한다.

그림 2는 초기값(n_0)을 입력하고, ART 알고리즘을 통해 전자 밀도를 반복적으로 계산하는 과정을 나타낸 것이다. 시선방향 총전자수 값과 각각의 pixel에서 계산된 값이 어느 한계값(τ)으로 수렴하면 전제적인 고도와 위도에 따른 2차원 공간상의 전자 밀도 분포가 계산되는 것이다.

4. 데이터 처리

지역적인 GPS 상시관측망을 이용하여 고도와 위도에 따른 전자분포 유형을 분석하기 위해 하루 동안(2003년 10월 29일)의 GPS 상시관측망(총 9개 관측소) 데이터를 처리하였다. 개발된 모델의

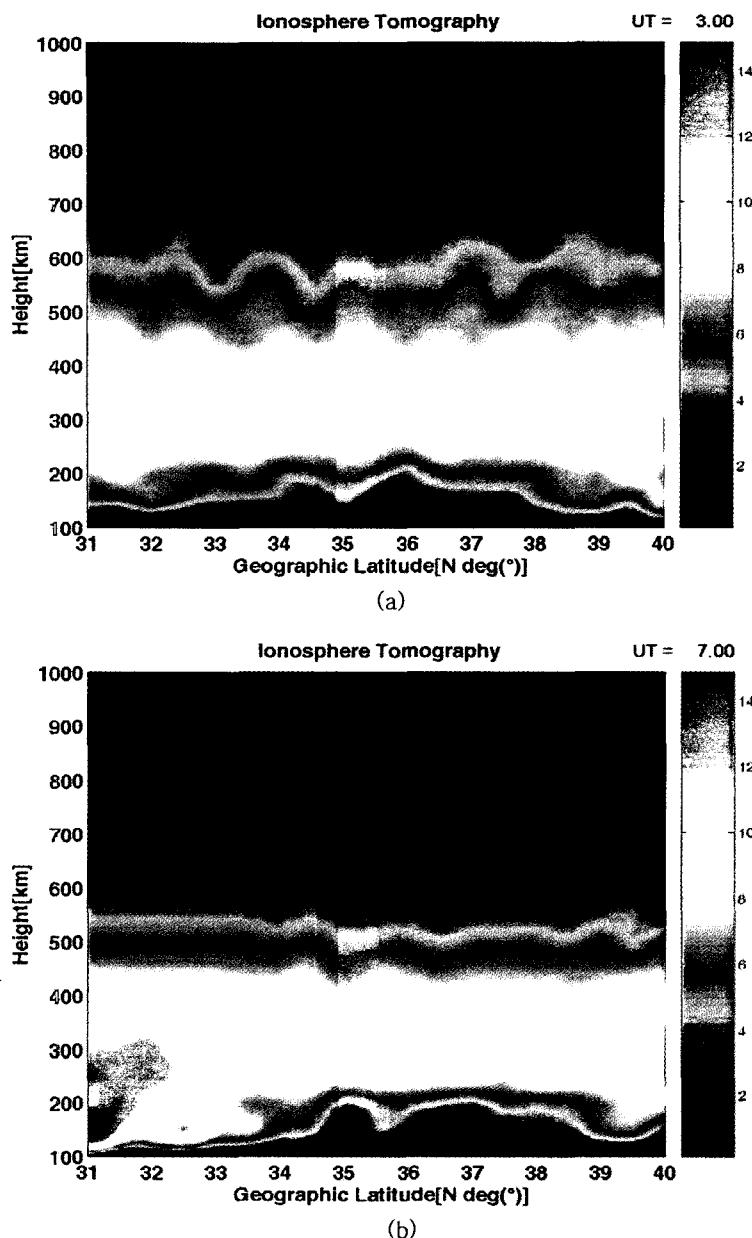


그림 3. 고도에 따른 전자밀도 분포 추정(단위, $10^{11} el/m^3$). (a) UT 3h, (b) UT 7h, (c) UT 12h, (d) UT 17h.

정밀도를 비교 검증하기 위해 동일한 날짜의 IRI-2001(International Reference Ionosphere) 모델값과 관측으로부터 얻어지는 Ionosonde 데이터를 이용하였고, 그에 대한 비교 결과를 그림 3에 나타내었다.

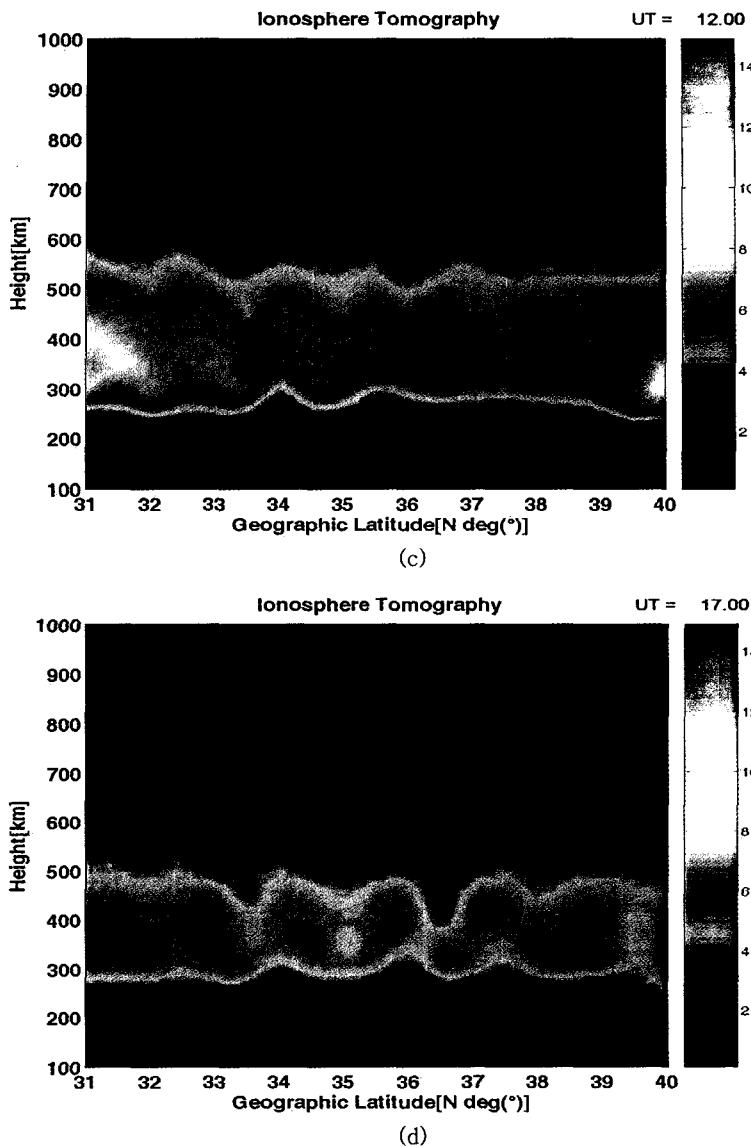


그림 3 계속

그림 3a,b,c,d는 각각 GPS에 의해 계산된 전리층 단층모형으로 고도에 따른 한반도 상공의 전자 밀도 분포를 의미한다. 그림 3a,b는 UT로 각각 3시와 7시에 해당되며, 전반적으로 고도 300km 내·외에 많은 전자들이 분포하는 것을 알 수 있다. 그림 3c,d는 각각 UT 12시와 18시에 해당하고, 이 시간대의 전자밀도 분포 유형은 그림 3a,b의 전자밀도 분포 유형과 유사하지만 전자 밀도가 가장 밀집된 고도의 차이를 확인할 수 있다. 즉, 그림 3a,b에서의 전자밀도 최대 분포고도는 약 250 ~ 350km이지만, 그림 3c,d의 최대 전자밀도 분포고도는 300 ~ 400km 사이이다. 그림 4는 임의의 위도·경

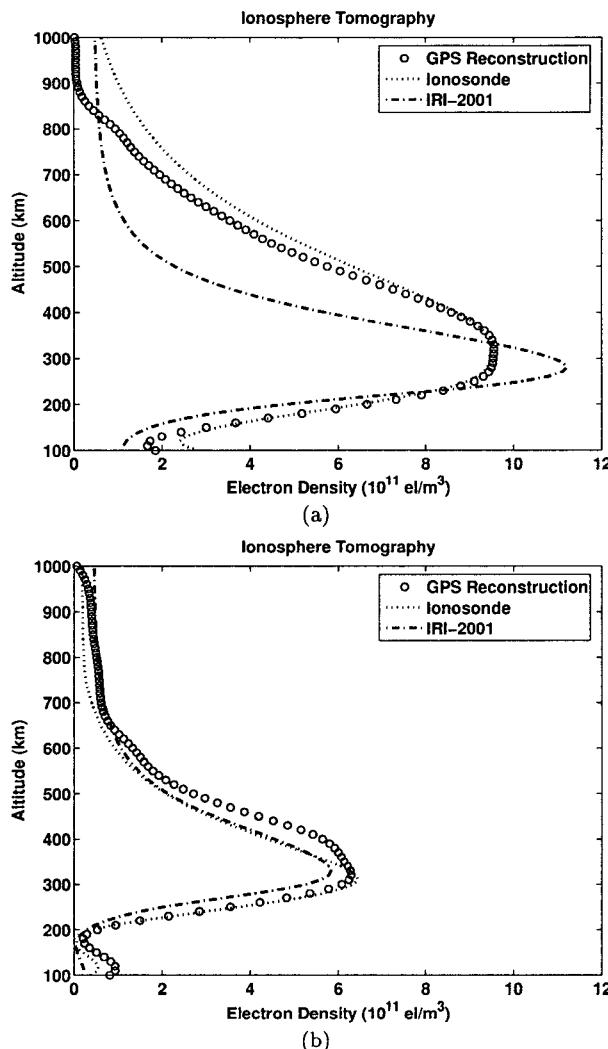


그림 4. 특정 위도(37.5°N)·경도(128°E)에서 고도에 따른 전자밀도 분포 비교. (a) UT 7h, (b) UT 17h.

도($37.5^{\circ}\text{N}, 128^{\circ}\text{E}$)에서 고도에 따른 전자밀도 분포를 추정한 것이다. GPS를 이용한 고도에 따른 전자분포 추정 값과 경험적 모델인 IRI-2001모델 값 그리고 Ionosonde로부터 얻어지는 관측 값은 서로 비교하였다. 여기에서 그림 4a,b는 각각 UT로 7시와 17시에 해당한다. 그림 4a는 GPS 재구성에 의한 전자밀도 추정 값이 Ionosonde 관측 값과 잘 일치하는 특성을 보였고, 경험적 모델인 IRI-2001과는 잘 일치하지 않는 경향이 나타났다. 그러나 그림 4b에서 볼 수 있듯이 각각에 의해 추정된 전자밀도 분포가 전체적으로 서로 잘 일치하는 것을 알 수가 있었다.

표 1은 앞서 비교한 모델간의 RMS(Root Mean Square)차이를 시간대 별로 각각 나타낸 것이다. UT로 7시에는 개발된 모델과 Ionosonde 관측 값의 RMS 차이가 $0.590 \times 10^{11} \text{el}/\text{m}^3$ 이며, IRI-2001과

표 1. GPS 재구성 모델과 비교 모델간의 RMS(단위, $10^{11} el/m^3$).

모델	UT 7h	UT 17h
KASI-Ionosonde	0.590	0.487
KASI-IRI2001	1.850	0.594

는 $1.850 \times 10^{11} el/m^3$ 으로 산출되었다. 또한 UT로 17시에는 개발된 모델과 두 모델간의 RMS 차이가 각각 $0.487 \times 10^{11} el/m^3$ 과 $0.594 \times 10^{11} el/m^3$ 로 계산되었다. 위의 결과로부터 GPS를 이용한 전리층 단층 모델이 경험적 모델인 IRI-2001에 의해 산출된 결과보다는 Ionosonde에 의해 관측된 전자분포와 잘 일치하는 경향이 나타남을 알 수가 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 한국천문연구원에서 운영하는 GPS 상시관측망을 이용하여 한반도 상공의 고도에 따른 전리층 전자분포 추정하였다. GPS를 이용하여 전리층 전자분포 추정을 위해 ART 알고리즘을 적용하였고, 격자기반의 모델 구성을 위해 고도 100km에서 1,000km까지의 공간을 50km 단위로 세분화하여 전자밀도를 계산하였다. 또한 시간에 따른 한반도 상공의 전자분포 변화 유형을 제시하였고, 경험적 모델인 IRI-2001 값과 관측으로부터 얻어지는 Ionosonde 관측 자료를 이용하여 비교하였다. 그 결과 GPS에 의해 산출된 값이 Ionosonde 관측값과는 잘 일치하는 경향이 나타났으며, IRI-2001모델과는 상대적으로 차이가 큼을 확인할 수 있었다.

향후 개발된 GPS에 의한 토모그래피 모델을 기반으로 태양 활동 및 지자기 폭풍 등 우주환경 변화로 인한 고도에 따른 전리층내의 전자분포를 감시하는 체계를 구축하고 동시에 실시간 응용을 위한 기반을 마련한다면, 자국내 위성체 보호 및 각종 통신장애 예측 등에 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Austen, J. R., Franke, S. J., & Liu, C. H. 1988, Radio Science, 3, 299
 Fedrizzi, M., Langley, R. B., Komjathy, A., Santos, M. C., Paula, E. R., & Kantor, I. J. 2001, in ION GPS (Colorado: Colorado Springs), pp.2468-2475
 Komjathy, A. 1997, PhD Thesis, University of New Brunswick
 Liao, X. 2000, PhD Thesis, University of Calgary
 Mequel, G. F. 2004, PhD Thesis, University of Catalonia
 Pryse, S. E., Kersley, L., Andreeva, E. S., Khudukon, B. Z., & Melnichenko, Y. A. 1995, Geophysics, 13, 1242
 Skone, S. 1998, PhD Thesis, University of Calgary
 Sutton, E. & Na, H. 1996, IEEE Signal Processing Society, 3, 523
 Yizengaw, E., Dyson, P. L., & Essex, E. A. 2004, in Workshop on Application in Radio Science (WARS), ed. P. Wilkinson (Hobart: Union Radio Science International)