

GPS의 P 코드를 이용한 이온층의 총전자수 측정

서윤경¹, 박필호², 박종욱², 이동훈¹

¹경희대학교 우주과학과, ²천문대 응용천문연구부

THE MEASUREMENT OF THE IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT USING P-CODE OF GPS

Yoon-Kyung Seo¹, Pil-Ho Park², Jong-Uk Park² and Dong-Hun Lee¹

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Kyunghee Univ., Yongin 449-701

²Korea Astronomy Observatory, Taejeon 305-348

(Received May 25, 1994; Accepted June 10, 1994)

요 약

GPS를 이용하여 이온층의 총전자수를 측정하는 방법은 기존의 다른 방법에 비하여 넓은 지역에 대한 이온층의 변화를 보다 정확하게 조사할 수 있다고 알려져 있다. 이 연구에서는 GPS 위성으로부터 두개의 L-band 주파수, L1(1574.42MHz)과 L2(1227.60MHz)에 실려 전송되는 P 코드의 이온층에 의한 전파 도달 시각차이를 이용하여 각각의 위성에 대한 시선방향의 총전자수를 측정하였다. 그리고 이온층이 균질하며 평균 높이가 350km라고 가정했을때, 시선방향이 평균 높이와 교차하는 지점에서의 수직방향 총전자수로 각각 변환하여 이를 평균하는 방법을 택하였다. 국내에는 이중주파수용 P 코드 수신기가 없는 관계로 국제 공동 GPS 관측망의 핵심 관측소 중 하나인 Taiwan의 TAIW GPS 관측소 (N25도, E121.5도)에서 관측된 GPS 자료를 이용하였다. 측정된 총전자수의 1일 변화 양상을 NOAA의 SOLAR-DAILY 자료 및 GPS의 이온층 보정 모델 (Klobuchar 1987)과 비교한 결과, 거의 같은 양상이 나타났다. 즉, 총전자수의 값이 낮아지는 낮에는 높아지고 밤에는 낮아지는 전형적인 1일 변화 곡선을 보였다. 그리고 이 연구방법에 의한 총전자수 측정 정밀도는 SOLAR-DAILY 자료와 비교한 결과, 약 2 TEC인 것으로 추정되었다.

ABSTRACT

It is generally known that the measurement of the ionospheric total electron content(TEC) by GPS can more accurately monitor the broader area of the ionosphere than other current methods. We measured the TEC along a slant

path considering the arrival time differences of P-code which is transmitted from GPS satellites with the modulation on two L-band carrier frequencies, L1 (1574.42MHz) and L2 (1227.60MHz). Under the assumptions that the ionosphere is uniformly distributed and its average height is 350km, we transformed the slant TEC to the vertical TEC at the point that the line-of-sight direction to GPS satellite cut across the average height of the ionosphere. Because there is no dual frequency P-code GPS receiver in Korea, we used the data observed at the TAIW GPS station (N25°, E121.5°) in Taiwan which is one of the core stations in International GPS and Geodynamics Services (IGS). The TEC values obtained in this work showed a typical daily variation of the ionosphere which is high in the daytime and low in the nighttime. Our results are found to be consistent with the SOLAR-DAILY data of NOAA and the Klobuchar's model for the ionospheric correction of GPS. In addition, in the comparison with SOLAR-DAILY data, we estimated the precision of our TEC measurement as 2 TEC.

1. 서론

GPS(Global Positioning System)는 인공위성으로부터 전파신호를 수신하여 자신의 3차원 위치와 속도, 방향 및 시각을 자동으로 측정함으로써 날씨에 관계없이 지구상 어디에서나 하루 24시간 위치측정이 가능한 고정밀 위성항법 체계이며, 현재 선박이나 자동차, 비행기 등의 항법은 물론 정밀측지 및 통신, 우주분야에 이르기까지 다양한 분야에 급속히 활용되고 있다 (박필호 외 1992). GPS 위성의 지상높이는 약 20,183km로 공전주기는 약 12시간이며, 궤도는 거의 원궤도에 가깝고 (이심률 ≤ 0.03), 총 24개의 위성 (Block II)이 각 궤도당 (총 6개) 4개씩 배치되어 있다. 궤도경사각은 55°이고, 궤도면끼리의 사잇각은 적도면에 60°씩 등간격으로 배치되어 하루 24시간 어디에서나 지평면 고도 5° 이상의 위성들을 4개 이상씩 볼 수 있도록 설계되어 있다. 그리고 GPS 위성은 L1 (1575.42MHz)과 L2 (1227.60MHz) 두 개의 송신주파수에 정보를 실어 지상의 수신자에게 전달하는데, 이러한 전파 또한 전자기파이므로 이온층이나 대류층 등의 지구대기에 의한 영향을 받게 된다.

지구표면으로부터 약 50km에서 2000km에 해당하는 이온층은 같은 수의 전자와 양이온의 대전된 입자들로 구성되어 있어 이러한 입자들의 양과 분포 및 움직임에 의해 GPS를 포함하여 통신, 항해등의 전파를 사용하는 시스템에 영향을 받기 때문에 중요한 연구 대상이 되어 왔다. 기존의 이온층 조사에 쓰이는 방법들은 비간섭성 산란 레이더 (incoherent scatter radar)와 같은 장비를 이용하여 지상에서 관측하는 기술과, 패러데이 회전 (Faraday rotation) 방법이나 차등 도플러 (differential Doppler) 방법과 같이 위성으로부터 오는 전파신호를 사용하여 이온층의 상태

를 알아내는 우주관측 기술이 있다 (Coco 1991). 그러나 몇 년 전부터 GPS를 이용한 이온층 연구 방법이 고안되어 기존의 방법들을 대신하고 있다. 그 이유는 패러데이 회전방법에 쓰이는 새 세대 정지궤도 위성들이 이온층 연구에 적합치 않은 고주파를 사용하므로 적용키가 어렵다는 것과, 차등 도플러 방법에 사용되었던 Transit 위성을 GPS가 대신함으로써 매우 낮은 비용으로 보다 넓은 지역에 대한 이온층 감시가 가능하기 때문이다.

GPS를 이용한 이온층 측정 방법으로 첫번째 방법은 L1과 L2 두개의 송신주파수에 실려 송신되는 P 코드의 이온층에 의한 전파지연 차이를 이용하여 총전자수를 측정하는 것과 두번째 방법은 두개의 송신주파수의 위상을 측정하여 그 차이로부터 오차를 포함하고 있는 총전자수 (biased TEC)를 구하는 것이다. 두번째 방법의 경우에는 직접적인 총전자수를 측정하기 보다는 총전자수의 변화량을 보는 것이라 할 수 있는데, 이는 위상을 이용한 방법이 코드를 이용한 방법보다 더 정밀하나 알려지지 않은 오차를 포함하고 있어서 실제 총전자수를 알아내기 힘들기 때문이다. 그러므로 코드와 위상측정에 의한 방법이 함께 쓰인다면 위상측정에 해당하는 정밀도를 갖으면서 총전자수의 값도 함께 결정할 수 있을 것이다. 이 연구는 첫 단계로서 P 코드를 이용하는 방법을 사용하여 이온층의 총전자수를 측정하였다.

2. 측정 원리

전파가 진행하는 동안 이온층은 최소한 두 가지 방식으로 영향을 미친다. 첫째, 대전된 입자들이 전자기파로부터 에너지를 빼앗아 신호를 약하게 하는 감쇄효과이며 둘째, 전자밀도가 일정치 않은 길을 따라 진행하는 전파의 진행경로가 굽어지는 굴절현상이다 (Tascione 1988). 그러나 GPS 위성처럼 GHz에 해당하는 고주파를 사용하는 경우에 감쇄효과는 거의 미약하고 굴절만을 받게 된다. 전파의 굴절이 이온층 전자들의 밀도와 전파의 주파수에 의해서 결정되는 것을 표현한 식이 Appleton-Hartree 식 (Davies 1965)이다. 이 방정식은 외부 자기장이 걸려 있지 않고 고주파인 경우처럼 충돌이 무시된다고 가정했을때, 다음과 같이 단순화될 수 있다 (Clynch *et al.* 1989).

$$n = 1 + \frac{A \cdot N}{f^2} \quad (1)$$

여기에서 n 은 굴절률, N 은 전자수 밀도 (electron number density), f 는 전파의 주파수, 그리고 A 는 상수로서 $A = 40.3 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ 이다. 식(1)은 그룹속도에 대한 굴절률을 표현한 것으로, GPS의 코드 신호가 이온층을 통과하는 동안 위의 그룹속도에 의한 굴절정도 만큼 지연(group delay)이 된다 ($n = n_{gr} > 1$). 반대로 위상 측정시에는 식(1)에서 부호가 바뀌며 위상속도에 의한 굴절률 ($n = n_{ph} < 1$)을 사용하게 되므로 수신자로부터 위성까지의 실제 거리보다 오히려 짧게 측정이 된다. 식(1)을 위성까지의 시선방향에 대하여 적분하여 주면 다음과 같다.

$$\int nds = R_o + \frac{A}{f^2} \int Nds \quad (2)$$

윗 식에서 $\int n ds$ 는 위성으로부터의 송신된 신호가 굴절되어 전달된 총거리를 나타내고, R_o 는 이온층에 의한 굴절을 거치지 않은 위성으로부터 수신기까지의 기하학적인 거리를 말한다. 그리고 $\int N ds$ 는 위성까지의 시선방향에 대한 이온층의 전자수를 더한 양으로 단위 기둥내의 총 전자수 (TEC: Total Electron Content)가 된다. 즉 $1m^2$ 의 단위면적을 가진 기둥내의 전자들의 수를 말하는 것이다. 그러므로 이온층에 의한 굴절을 포함한 양을 나타내는 $\int n ds$ 를 R_{ion} 이라 놓으면, 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{ion} = R_o + \frac{40.3}{f^2} \cdot TEC \quad (3)$$

총전자수의 단위는 일반적으로 TEC로 나타내며, 1 TEC는 1×10^{16} electrons/ m^2 에 해당한다. 총전자수는 태양활동, 계절, 일변화, 지구 자기풍 및 수신자의 위치, 시선 방향에 의해 그 값이 변화한다. 보통의 중위도인 경우, 이온층에 의해 지연되는 양이 낮에는 5 ~ 15m 정도이고 밤에는 2m 정도이다 (Coco et al. 1990).

3. 측정 방법

앞에서 기술한대로 이 연구에서는 이온층의 총전자수를 측정하기 위하여 L1과 L2 두개의 송신주파수에 실려 오는 P 코드에 의한 가상거리 (P1, P2)의 차이를 이용하였다. 즉 굴절률이 주파수만의 함수이고 이온층을 제외한 다른 전파매질에 굴절이 없다고 가정하면, 동일한 코드가 실려 있는 두개의 서로 다른 주파수는 이온층에 의하여 굴절되는 정도가 다르게 되며, 결국 전파지연에 의하여 수신기에서 측정되는 P 코드의 가상거리에 차이가 발생한다. 이와 같이 L1과 L2 두개의 송신주파수에 실려 송신되는 P 코드가 이온층에 의해 굴절된 거리의 차이를 식(3)에 의해 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta R_{ion} = R_{ion}(L2) - R_{ion}(L1) [m] \quad (4)$$

결국 윗 식으로부터 다음과 같이 총전자수를 구할 수 있다.

$$TEC = \frac{\Delta R_{ion}}{40.3 \cdot \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} [el./m^2] \quad (5)$$

여기에서 f_{L1} 은 L1파의 고유진동수로써 1575.42 MHz이고, f_{L2} 는 L2파의 고유진동수로 1227.60 MHz 이다. 그리고 ΔR_{ion} 은 이중주파수용 수신기로 P 코드를 측정하여 직접적으로 얻을 수 있는 가상거리 P1, P2의 차에 해당하므로, 식(5)에 직접 대입함으로써 총전자수의 값이 얻어지고 이온층의 변화량도 알 수 있게 된다.

위성의 신호는 이온층의 다른 지역을 통과하여 여러 방향으로부터 들어오게 된다. 따라서 위에서 기술한 총전자수 측정은 각 위성의 시선방향에 대한 총전자수이므로 이를 수직인 방향의 총

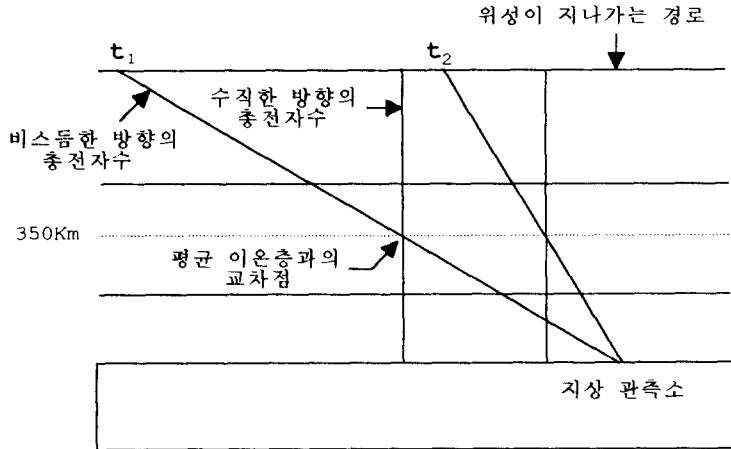


그림 1. 비스듬한 경로와 수직방향의 총전자수 Clynych *et al.* (1989).

전자수로 바꾸어 주어야 한다. 시선방향의 총전자수를 수직방향의 총전자수로 변환하기 위하여 Clynych *et al.* (1983)의 모델을 사용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 이온층의 평균 수직높이를 350km라 가정하고 (Wild *et al.* 1988), 시선방향의 총전자수를 이온층 평균 높이와의 교차점에서의 수직방향 총전자수로 환산하였다. 이를 수신자의 천정방향으로 세우지 않는 이유는 위성이 위치한 지역과 수신자의 천정방향 부근의 이온층 상태가 다를 것이므로 이러한 점을 고려한 것이라 할 수 있으며, 변환방법은 다음과 같다.

$$TEC_v = \frac{TEC_s}{Q(E)} \tag{6}$$

여기에서 TEC_s는 시선방향으로 측정된 총전자수, TEC_v는 수직방향으로 환산할 총전자수, Q(E)는 기울기함수(obliquity factor)이다. 기울기함수 Q(E)는 다음과 같다.

$$Q(E) = \sum_{i=0}^3 a_i X^{2i} \tag{7}$$

계수 a_i는 표 1에 주어져 있고, 이 값들은 이온층이 높이 200km와 600km 사이의 균질한 구껍질이라 가정했을때 Q함수를 least-squares fit시켜서 얻어진 값들이며, 식(7)에서 X = 2E/π로 정의된다. 여기에서 E는 위성의 고도각이다.

표 1. 기울기함수의 계수(a_i) 값.

기울기 계수	값
a_0	1.0206
a_1	0.4663
a_2	3.5055
a_3	-1.8415

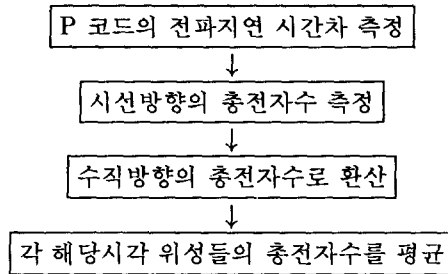


그림 2. 전체적인 측정방법 요약도.

위와 같은 방법에 의해 TAIW 관측소를 중심으로 고도 20° 이상에서 관측된 위성들 개개의 총 전자수가 얻어진 후, 해당시각에서의 총 전자수를 결정하기 위하여 각 위성들의 총 전자수에 대해 평균을 취하였다. 그림 2는 전체적인 측정방법을 요약한 것이다.

4. 측정 결과 및 비교

현재 국내에는 이중주파수용 P 코드 수신기가 없기 때문에, 국제 GPS 관측망 (International GPS & Geodynamics: IGS)의 핵심 관측소중 하나인 Taiwan의 TAIW 관측소의 관측 데이터를 사용하였다. ITRF '92 (International Terrestrial Reference Frame 1992)에 의한 TAIW 관측소의 좌표는 N25도, E121.5도이다. 이 데이터는 Rogue SNR-800 GPS 수신기로 관측됐으며, 관측시기는 1994년 3월 13일부터 4월 11일까지 30일 동안이다. 그림 3은 하루동안 (3월 13일) Taiwan지역의 총 전자수가 변하는 모습을 10분 간격으로 나타낸 것으로 낮에는 전자들의 양이 많아지고 밤에는 감소하는 전형적인 이온층의 일변화를 보여준다. 이 그림에서 나타나는 총 전자수의 최대값은 지방시로 12시 50분이고 최소값은 새벽 5시이며, 30일 동안의 경향을 보았을때 최대값은 평균 정오에서 낮 3시 사이이고 최소값은 새벽 4시에서 5시경이다.

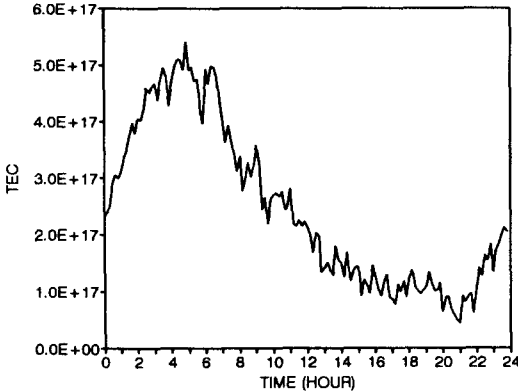


그림 3. Taiwan에서 측정된 하루동안의 총전자수 변화.

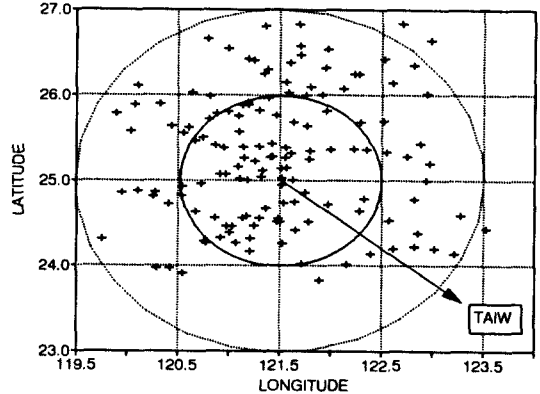


그림 4. TAIW 관측소를 중심으로 하는 위성들의 평균좌표.

그림 3에서 보여주는 총전자수는 한 개의 위성이 아닌 각 해당시각마다 고도 20°이상의 위성들에 대한 수직방향 총전자수를 평균한 것이다. 이들 각 시간마다 평균한 위성들의 좌표는 그림 4에서 처럼 TAIW 관측소를 중심으로 반경 2°내에 대부분이 위치하였다. 그림 5에서는 30일 동안(94.3.13 - 94.4.11) 총전자수들이 변하는 양상을 보여준다. 가로축은 일(day)수를 나타내고 있는데, 곡선 1개가 하루에 해당하므로 총 30개의 변화곡선이 있음을 볼 수 있다. 한 가지 흥미로운 점은 각 곡선의 최대값만을 연결해 보았을때 일종의 주기성이 나타남을 볼 수 있다. 이는 태양의 표면활동과 관련된 것으로 추정되나, 태양활동에 관한 위성의 관측자료 및 지상 관측자료등과 자세한 비교 연구가 보다 필요한 부분이다.

연구 결과의 정확성을 보기 위하여 두 가지의 방법으로 결과를 비교하였다. 먼저 NOAA의 SOLAR-DAILY 자료 중에서 Taiwan의 지상이온층 감시국 중의 하나인 TAO (Taoyuan)의 데이터와 비교하였다. 이 자료는 GPS를 이용한 방법이 아닌 지상에서 레이더에 의해 관측된 것이다. 그림 6은 이틀동안 (94.4.3 - 94.4.4) 측정된 총전자수 결과와 TAO 자료의 값들을 비교한 것으로 총전자수의 곡선이 거의 유사한 양상을 보이고 있으며, 두 곡선의 최대값 사이의 차이는 8 TEC 정도로 나타났다. 그리고 P 코드를 이용한 측정방법의 정밀도를 알아보기 위해 표 2에서와 같이 TAO의 좌표 (N25도, E121도)와 거의 동일한 위도, 경도를 가지는 (±1° 이내) 위성들만을 선택해 시간에 관계없이 총전자수를 비교해 보았다. 그 결과 다음 표 2의 제일 오른쪽 칸에서와 같이 2 TEC ($2 \times 10^{16} \text{el./m}^2$) 내에서 일치함을 볼 수 있었으며, 이러한 2 TEC의 정밀도는 지연 거리 약 30cm에 해당하는 값이다. P 코드 칩(chip) 하나의 길이가 30m이고, 이에 따른 신호 대 잡음비 (signal to noise)가 1%인 30cm 정도이므로 2 TEC가 P 코드로 총전자수를 측정할때 얻을 수 있는 정밀도의 한계를 나타낸다고 판단된다.

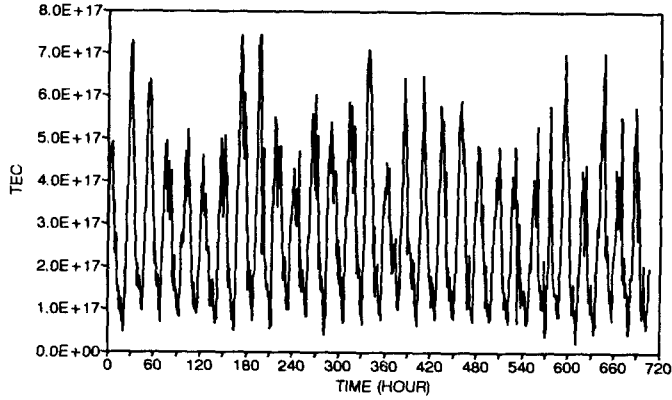


그림 5. Taiwan의 30일 동안 측정된 총전자수 변화.

표 2. TAO의 위치와 같은 좌표의 위성들과의 총전자수 비교.

시간(시)	위성번호	위성의 좌표		측정된 TEC ($\times 10^{16}$)	TAO ($\times 10^{16}$)	측정된 TEC - TAO
2	21	N24.8	E120.9	40	42	2
8	28	25.7	121.8	41	42	1
9	31	25.7	120.9	39	41	2
13	2	26.1	120.5	25	25	0
14	2	24.6	121.0	26	24	2
15	7	26.1	122.3	16	18	2
22	17	26.1	120.1	18	17	1
23	17	24.4	120.4	26	26	0

두번째 비교 방법은 단일 수신기 사용자들에게 가장 널리 알려진 Klobuchar's model (Klobuchar 1987) 과의 비교이다. 원래 C/A 코드로 측정된 가상거리를 이 모델에 적용하면, 50 ~ 60% 정도의 이온층 오차를 계산해 낼 수 있으나 (Feess and Stephens 1987), 여기에서는 P 코드의 가상거리를 사용하므로 모델의 정확도가 좀 더 나올 것으로 생각된다. 그림 7은 P 코드를 측정하여 얻어진 가상거리 P1을 Klobuchar's model에 적용한 결과와 이 연구의 측정 결과를 하루동안 (3월 29일) 비교한 것이다. TAO와의 비교결과보다 오차는 크게 나타났지만, 두 가지 결과곡선의 양상이 비슷함을 볼 수 있다.

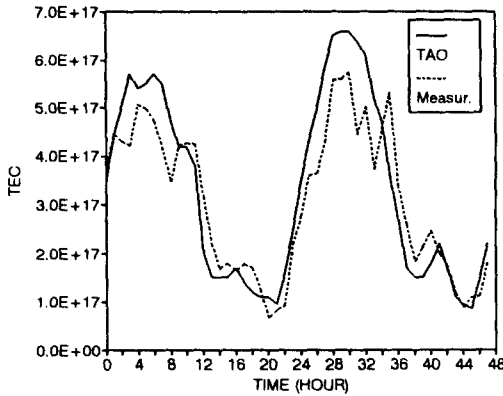


그림 6. TAO 데이터와의 비교.

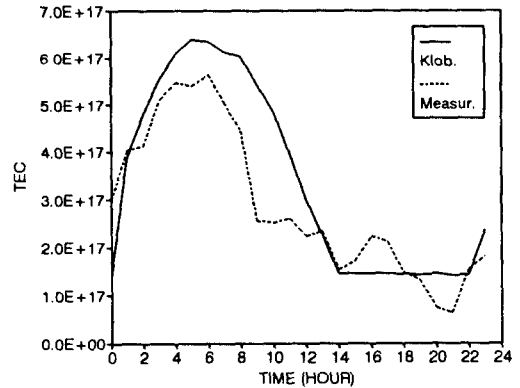


그림 7. Klobuchar's model과의 비교.

5. 결 론

GPS 위성으로부터 송신되는 P 코드를 이용하여 2 TEC ($2 \times 10^{16} \text{el./m}^2$)의 정밀도로 이온층의 총전자수를 측정할 수 있었다. 이러한 측정방법은 수신자의 근방지역에 대한 이온층의 mapping을 가능하게 하며, 위도별 중요 지점에서의 관측을 통해 전 세계의 이온층 상태도 알 수 있을 것이다. 국내에 이중주파수용 P 코드 수신기가 도입될 경우, GPS를 이용한 한반도 전역에 대한 이온층 실시간 감시 및 예보가 가능하리라고 예측된다. 미국방성에서 P 코드를 암호화시켜 일반인이 사용할 수 없도록 하는 AS (Anti-Spoofing)가 실시될 때에는 P 코드를 이용하여 이온층의 총전자수를 측정하는 방법에 제약이 따르며, 코드를 이용하는 방법보다 위상을 이용한 방법이 더 정밀하므로 앞으로 송신주파수의 위상변화를 이용한 총전자수 측정기술 개발이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 박필호, 한인우, 이정숙, 심경진 1992, 기본연구 보고서(92-5100-002), 과학기술처, 3
 Clynch, J. R., Coco, D. S. & Renfro, B. A. 1983, J. Atm. & Terr. Phys., 45, 7, 527
 Clynch, J. R., Coco D. S. & Coker, C. 1989, Proc. of ION GPS, 445
 Coco, D. S. 1991, GPS world, 2, 9, 47
 Coco, D. S., Coker, C. & Clynch, J. R. 1990, Proc. of ION GPS, 169
 Davies, K. 1965, Ionospheric Radio Propagation, (Dover Pub.: New York), p. 71
 Feess, W. A. & Stephens, S. G. 1987, IEEE Trans. on Aero. & Elec. Sys., AES-23, 332
 Klobuchar, J. A. 1987, IEEE Trans. on Aero. & Elec. Sys., AES-23, 325

- Tascione, T. F. 1988, Introduction to the Space Environment, (Orbit book com.: Florida),
p. 65
- Wild, U., Beutler, G., Guthner, W. & Rothacher, M. 1988, Proc. 5th Int. Geod. Symp. on
Satellite Positioning, 2, 724