

## GPS 시각 전송에서의 대류층 천정지연 모델과 매핑 함수에 따른 시각오프셋 비교

유동희\*

### Comparison of Time Offsets by Tropospheric Zenith Path delay models and Mapping Functions in GPS Time Transfer

Dong-Hui Yu\*

Department of Software, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

#### 요 약

본 논문은 GPS 시각 전송 기법 중 GPS 신호가 전달되면서 발생하는 대류층 지연이 시각오프셋 결정에 미치는 영향 정도를 분석하기 위한 연구이다. GPS 시각 전송은 CGGTTS 국제표준을 따르고 있다. 일반적인 측지용 GPS 수신기의 경우, CGGTTS 형태의 시각 전송 값을 출력하지 않고 RINEX 형태의 값을 출력하는데, ROB에서 RINEX 형태의 값을 CGGTTS 형태로 변환하는 r2cggts 라는 프로그램을 공급하고 있다. 전 세계 표준 시각을 결정하기 위해 TAI link에 참여하는 시각 실험실들은 모두 이 프로그램을 사용하여 주기적으로 CGGTTS 값을 BIPM에 전송한다. r2cggts 프로그램의 대류층 지연모델은 Chao mapping function과 NATO 천정지연모델이 구현되어 있다. 현재 대표적 대류층 지연 모델은 Niell mapping function과 Saastamoinen 천정지연모델이 사용되고 있는 바, 이 모델들을 r2cggts 프로그램에 적용하여 시각 오프셋 결정을 위한 두 모델의 지연 결과 값들의 영향을 비교하고 분석한다.

#### ABSTRACT

This paper shows effects of tropospheric delay models and mapping functions among delay features occurred when GPS code signal is transferred for GPS Time Transfer. GPS time transfer uses CGGTTS as the international standard format. For geodetic GPS receiver, ROB has provided r2cggts software which generates CGGTTS data from RINEX data and all laboratories participated in TAI link use this software and send the CGGTTS results periodically. Though Saastamoinen zenith path model and Niell mapping function are commonly used in space geodesy, r2cggts software applied NATO zenith path model and CHAO mapping function to the tropospheric delay model. Hence, this paper shows effects of two tropospheric delay models by implementing Saastamoinen model and Niell mapping function for the time offset.

**키워드** : GPS, 시각 전송, 대류층 지연 모델, 시각 오프셋, 시각 동기

**Key word** : GPS, Time Transfer, Tropospheric delay model, Time offset, Time synchronization

접수일자 : 2014. 05. 01 심사완료일자 : 2014. 05. 30 게재확정일자 : 2014. 06. 09

\* **Corresponding Author** Dong-Hui Yu(E-mail:dhyu@cup.ac.kr, Tel:+82-51-510-0643)

Department of Software, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.6.1317>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

GPS에서 송출되는 코드 신호를 이용한 시각비교는 기본적으로 위성으로부터 송출된 신호가 수신기까지 전달되는데 걸린 시간을 정확히 구하는 것이 가장 중요한데, 실제 여러 가지 요인에 의해 오차가 발생한다. 이에 해당하는 오차들로는 위성의 시계 오차, 위성의 궤도 오차, 수신기의 시계오차, 다중경로 오차, 대기를 통과할 때 발생하는 이온층 지연 및 대류층 지연 등이 포함된다.

그리고 시각전달에 사용되는 코드는 이온층 프리 조합을 적용할 수 있도록 P1, P2 코드를 사용한다. 수신된 P1, P2 관측 값은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P_{1,2} = \rho_{1,2} - c\Delta t_{rec} + c\Delta t_{sat} + I_{1,2} + Tr + \delta_{1,2}^P + \epsilon_{1,2}^P \quad (1)$$

$P_{1,2}$ 는 P1, P2 코드 각각을 표현하는 것이며,  $\rho$ 는 위성으로부터 수신기까지의 기하학적 거리로 항법메시지의 위성 궤도 정보와 수신기의 위치를 이용해서 구할 수 있다.  $c$ 는 빛의 속도,  $\Delta t_{rec}$ 는 수신기와 위성간의 시각비교결과이며 시각비교 결과 얻어져야 하는 결과 값이다.  $\Delta t_{sat}$ 는 위성시계의 오프셋이고 이를 보정할 수 있도록 항법 메시지에 다항식의 계수들이 제공된다.  $I_{1,2}$ 는 P1, P2 코드 각각의 이온층 지연,  $Tr$ 은 대류층 지연,  $\delta_{1,2}^P$ 는 위성 하드웨어 지연,  $\epsilon_{1,2}^P$ 는 노이즈 값이다. 이외에도 좀 더 정확한 시각비교를 위해서는 다른 요소들이 추가될 수 있으나 코드를 이용한 시각비교에서는 상기 요소들을 처리하도록 되어 있다[1,2].

본 논문에서는 상기 오류 요소 중 대류층 지연에 대한 모델들의 적용 결과를 비교하여 제시한다.

## II. 대류층 지연 모델

대류권의 지연오차는 크게 두 가지로 나누는데, 지표로부터 11~12km 사이에 수증기가 존재하는 습윤층, 그 상층의 40~50km 까지를 건조층으로 구분하여 대류층 지연을 계산한다. 대류권 지연은 중간 대기층을 통과하는 라디오파에 의하여 여행한 거리에 관계되므로 위성 양각의 함수이다. 대류권 신호 지연은 천정방향시 가장

작고, 양각이 낮아질수록 점점 커지는데 임의 양각에 대한 지연오차는 천정지연(ZPD, Zenith Path Delay)과 mapping function의 곱으로 나타낸다[3].

그림 1에서 보는 바와 같이, 위성을 관측하는 지점에 따라 신호를 수신하는 양각이 다른데, 양각의 크기에 따라 대류층을 통과할 때의 거리가 달라진다. 이를 보상하기 위해 양각에 따른 mapping function(mf)이 연구되고 있다.

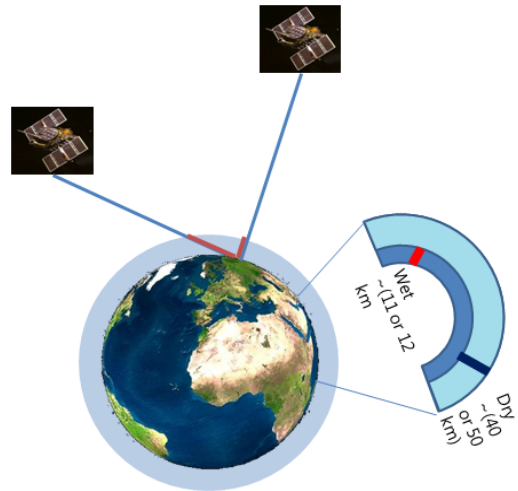


그림 1. 대류층 지연  
Fig. 1 Troposphere Delay

$$Tropo\_delay = MF_{hydro}(el) \cdot ZPD_{hydro} + MF_{wet}(el) \cdot ZPD_{wet} \quad (2)$$

건조층의 천정지연은 고도의 지표압력에 따른 모델로 주어지고 습윤층의 지연은 대기 중의 수증기 양에 의해 결정되므로 실제로 측정을 하거나 추정을 하게 되는데, 주로 추정에 의해 값을 얻는다. 대류권 지연의 약 90%는 건조성분으로부터 발생하므로 대류층에 의한 지연이 약 250cm 까지로 예측되는바, 약 230cm 정도의 지연오차가 건조층의 지연으로 제거될 수 있다. 본 논문과 r2cggts software는 건조층에 대한 모델링만 적용한다.

본 논문에서 비교하고자 하는 대류층 천정지연 모델로는 NATO 모델과 Saastamoinen 모델을, mapping function 모델로는 Chao mapping function과 Niell

mapping function을 사용한다[4].

NATO 모델과 Chao mapping function은 시각 비교를 위해 전 세계 시간 주파수 실험실에서 사용하고 있는 r2cggts프로그램에 적용되어 사용하고 있는 모델이고, Saastamoinen 모델과 Niell mapping function은 대류층 지연 모델로 가장 널리 사용되고 있는 모델이다.

### 2.1. NATO model

NATO 모델은 r2cggts 소스 프로그램에 적용된 대류층 지연 모델로써, 오직 고도만을 고려한 지연 모델을 제안하고 고도를 3단계로 구분해서 지연을 계산한다. 사용자의 해수면으로부터의 고도가  $h(m)$ 일 때, 다음과 같은 지연모델을 제시하였다.

$$d_{trop}^{\bar{e}}(h) = [d_{trop}^{\bar{e}}(1) + d_{trop}^{\bar{e}}(2) + d_{trop}^{\bar{e}}(3)] \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

여기서, 사용자의 고도  $h$ 에 따라 1km 이하인 경우

$$\begin{aligned} d_{trop}^{\bar{e}}(1) &= N_s(1-h) + \frac{1}{2}(\Delta N(1-h^2)), \\ d_{trop}^{\bar{e}}(2) &= 1430, \\ d_{trop}^{\bar{e}}(3) &= 732. \end{aligned}$$

$h$ 가 1km에서 9km 사이인 경우는

$$\begin{aligned} d_{trop}^{\bar{e}}(1) &= 0, \\ d_{trop}^{\bar{e}}(2) &= \frac{N_1}{c}(e^{-c(h-1)} - e^{-8c}), \\ d_{trop}^{\bar{e}}(3) &= 732. \end{aligned}$$

고도가 9km이상인 경우

$$\begin{aligned} d_{trop}^{\bar{e}}(1) &= 0, \\ d_{trop}^{\bar{e}}(2) &= 0, \\ d_{trop}^{\bar{e}}(3) &= \frac{105}{0.1424} \cdot e^{-0.1424(h-9)}. \end{aligned}$$

로 정의하였다. 여기서  $N_s$ 는 평균 글로벌 굴절도(mean global surface refractivity)로 324.8로 정의하였다.

### 2.2. Saastamoinen 모델

Saastamoinen 모델은 지표면으로부터 11~12km까지는 습윤층, 그 이상에서 50km까지를 건조층으로 양분하여 표준 모델 식을 아래와 같이 제안하였다[5].

$$T_{Sms} = \frac{2.277 \times 10^{-3}}{\cos z} \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \times \tan^2 z \right] + \delta R \quad (4)$$

$T$ 는 온도(K),  $P$ 는 atmospheric pressure(mb),  $e$ 는 partial pressure of water vapour(mb),  $R_h$ 는 relative humidity(%)이다.  $B$ 와  $\delta R$ 는 관측 스테이션의 고도에 의한 향으로 테이블 형태로 주어진다[6].

온도 변수 변환은 다음과 같이 이루어진다.

$$T(K) = T(Celsius) + 273.16 \quad (5)$$

압력, 온도, 습도 등은 측정되거나 표준 대기 모델에서 유도될 수 있는데, 고도의 함수로 압력, 온도, 습도는 주어진 모델에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} e &= R_h \exp(-37.2465 + 0.213166T - 0.000256908T^2) \\ P &= P_0 [1 - 0.000226(H - H_0)]^{5.225}, \\ T &= T_0 - 0.0065(H - H_0), \\ R_h &= R_{h_0} \exp[-0.0006396(H - H_0)] \end{aligned}$$

여기서,  $P_0$ ,  $T_0$ ,  $R_{h_0}$ 는 참조 고도  $H_0$ 에 대한 표준 압력, 온도, 습도이며 기본적으로  $P_0$ 는 total surface pressure로 1013.25mb,  $T_0$ 는 18°C,  $R_{h_0}$ 는 50%,  $H_0$ 는 0m가 표준 입력이다.  $z$ 는 천정각으로 90°에서 양각을 뺀 값이다.

### 2.3. Chao mapping function

Chao 모델은 1971년 화성 무인 탐사선 Mariner 호의 라디오 트래킹 수정을 위해 1974년에 개발된 대류층 매핑 함수이다. Chao는 2년간 라디오존데 데이터로부터 유도된 평균 굴절도 프로파일에 대한 경험적 조정을 통해 습윤층과 건조층을 독립적으로 다루었다. Chao의 mapping function은 가장 간단한 mapping function으로 다음과 같다[7].

$$R_i = \frac{1}{\sin E + \frac{A_i}{\tan E + B_i}} \quad (6)$$

$$\text{Adry} = 0.00143, \text{Bdry} = 0.0445,$$

$$\text{Awet} = 0.00035, \text{Bwet} = 0.017$$

2.4. Niell mapping function

Niell은 1996년에 지표의 기상학적 매개변수에 의한 기반을 두지 않고 시간변화와 지리학적 위치에 기반을 둔 매핑함수를 제안하였다. Niell의 mapping function은 다음과 같다[8].

$$NMF_h(\epsilon) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{c}{1+c}} \frac{1}{\sin\epsilon + \frac{a}{\sin\epsilon + c}} + \frac{1}{\sin\epsilon} \left[ \frac{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}}}{1 + \frac{c_{ht}}{1+c_{ht}}} \frac{1}{\sin\epsilon + \frac{a_{ht}}{\sin\epsilon + c_{ht}}} - \frac{1 + \frac{b_{ht}}{c_{ht}}}{1 + \frac{c_{ht}}{1+c_{ht}}} \frac{1}{\sin\epsilon + \frac{b_{ht}}{\sin\epsilon + c_{ht}}} \right] \quad (7)$$

$\epsilon$ 은 양각이고 ht는 km 단위의 수신기의 고도이다. [] 안의 값은 고도에 따른 값으로 설정되어 있다.

III. 대류층 지연 모델 적용에 따른 시각 오프셋 영향 비교

NATO와 Saastamoinen 천정지연 모델과 Chao 와 Niell mapping function 적용 결과를 통해 GPS 코드를 통한 시각 전송시 대류층 지연 모델이 시각 오프셋에 미치는 영향 정도를 분석하고자 한다.

이를 위해 ROB에서 배포한 기존의 r2cggts프로그램의 대류층 지연 모델 적용 코드를 수정하였다.

본 논문의 결과들은 2013년 3월 28일 (Modified Julian Day 56379) 한국 표준과학연구원의 GPS 관측 파일과 항법 파일을 수정한 r2cggts 프로그램에 적용하여 얻었다.

3.1. 대류층 지연 모델 적용 결과 비교

대류층 지연 모델의 적용 결과가 시각 오프셋에 미치는 영향을 파악하기 위해 대류층 지연 모델의 적용 결과들을 이해를 돕기 위해 위성별로 비교해 본다.

임의로 선택한 위성 23과 위성 1번의 대류층 지연 모델의 적용 결과를 그림 2와 그림 3에 제시하였다.

23번 위성의 경우 해당 관측일에 양각이 0도에서 최

대 40도 정도까지 관측되었고 1번 위성의 경우 10도에 서 90도까지 관측된 것을 알 수 있다.

대부분의 대류층 지연 모델은 10도 이하의 양각을 사용하지 않는데, 그림 2에서와 같이 그 값이 타당하지 않음을 확인할 수 있다. 그림 2와 그림 3에서 Saastamoinen 천정지연 모델에 Niell mapping function을 적용한 결과와 Chao mapping function을 적용한 결과는 크게 차이가 없이 안정적인 것을 알 수 있으며, NATO 천정지연 모델의 경우, mapping function에 따라 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며 70도 이상의 양각에서부터 안정적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

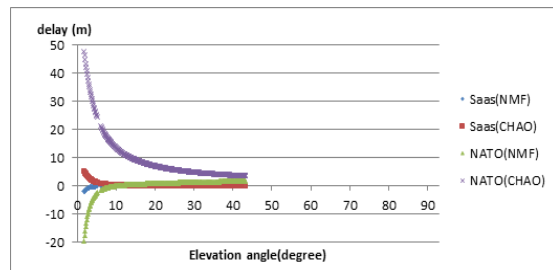


그림 2. 23번 위성의 양각에 따른 위성별 지연 길이 비교  
Fig. 2 Comparison of satellite 23's delays of tropospheric delay models in a point of elevation angle

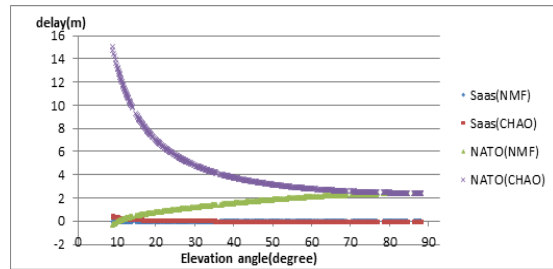


그림 3. 1번 위성의 양각에 따른 위성별 지연 길이 비교  
Fig. 3 Comparison of satellite 1's delays of tropospheric delay models in a point of elevation angle

그림 4와 그림 5는 관측 시간의 변화에 따른 대류층 지연과 양각을 같이 비교한 결과이다.

위성이 주기적으로 지구를 회전하기 때문에 관측 지점 상공에 해당 위성이 출현할 때부터 시간의 흐름에 따라 양각이 변화하고 있으며, 양각의 변화에 따른 대류층 지연 결과 값들도 변화하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4에서 위성 23번은 오후 1시 경부터 오후 5시 경 사이 관측지점의 반대편으로 회전하여 GPS 코드값을 수신하지 못하고 있고 그림 5에서는 오후 1시경부터 오후 7시경까지 GPS 위성의 양각이 0도에서 90도까지 변화함에 따른 대류층 지연 결과값을 확인할 수 있다.

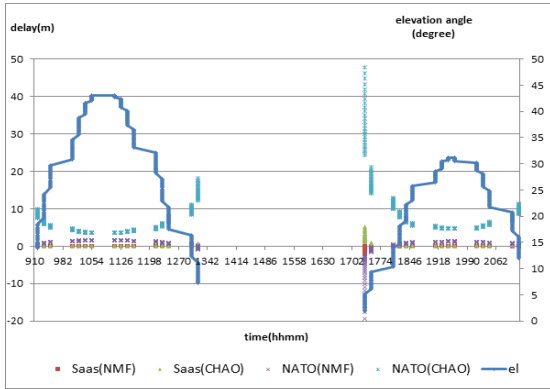


그림 4. 23번 위성의 대류층 지연 모델에 따른 양각과 지연 결과 비교  
**Fig. 4** Comparison of elevation angle and delay due to tropospheric delay model of satellite 23

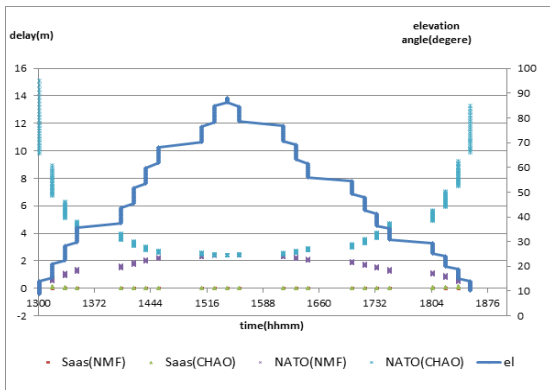


그림 5. 1번 위성의 대류층 지연 모델에 따른 양각과 지연 결과 비교  
**Fig. 5** Comparison of elevation angle and delay due to tropospheric delay model of satellite 1

### 3.2. 대류층 지연 모델 적용에 따른 시각 오프셋 결과 비교

그림 6은 대류층 지연 모델이 적용된 최종 CGGTTS 결과로서, GPS 위성과 한국표준과학연구원 GPS 수신기와의 시각 오프셋 결과를 나타내고 있다.

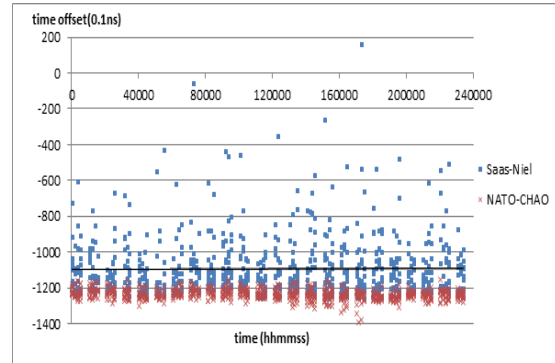


그림 6. 대류층 모델에 따른 시각오프셋 비교  
**Fig. 6** Comparison of time offsets due to tropospheric delay model

NATO-Chao 모델 적용 결과는 -130ns에서 -115ns 사이의 비교적 안정적인 시각 오프셋 결과를 보이고 있으나, Saastamoinen- Niell 모델 적용 결과에서 -400 ns 까지 다양한 시각 오프셋 결과를 나타내고 있다.

상기 대류층 지연 결과의 경우 양각이 비교적 높은 경우에는 두 모델의 조합이 유사한 값들을 나타내지만 양각이 낮은 경우에는 Saastamoinen-Niell 모델의 적용은 기존 NATO-Chao 모델의 적용에 비해 시각 오프셋 결정에 더 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 세계협정시를 계산하기 위해 사용하고 있는 시각 전달 및 비교 과정과 대류층 지연 모델의 적용 과정을 소개하였다. 대류층 지연 모델은 천정지연 모델과 mapping function을 이용하는데, 시각 비교를 위해 널리 사용되고 있는 r2cggts 프로그램에 구현되어 있지만 오래전 모델인 NATO 모델과 Chao mapping function과 현재 대류층 지연 예측 모델로 가장 많이 사용되고 있는 Saastamoinen 모델과 Niell mapping function을 소개하였다. 그리고 대류층 지연 모델의 GPS 시각 오프셋의 결정 영향 정도를 파악하기 위해 r2cggts 프로그램을 수정하여, 대류층 지연 모델의 결과값과 최종 CGGTTS 시각 오프셋 결과값들을 제시하고 그 영향 정도를 비교하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년도 부산가톨릭대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

### REFERENCES

- [1] P. Defraigne, G. Petit and C. Bruyninx, "Use of Geodetic Receivers for TAI," *33rd Precise Time and Time Interval (PTTI) meeting*, pp.341-348, Nov. 2001.
- [2] J. Levine, "Time transfer using multi-channel GPS receivers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, UFFC-46, pp.392-398, 1999.
- [3] P.H. Park, *The Research on Astronomical Information and Practical Application*, Korea Astronomy and Space Science Institute, 2004.
- [4] NATO (North Atlantic Treaty Organization), North Atlantic Treaty Organization, Doc. 4294, pp. A-6-34 - A-6-37, 1993.
- [5] Tropospheric Effects(Physical Influence of GPS Surveying), <http://what-when-how.com/gps/tropospheric-effects-physical-influences-of-gps-surveying/>
- [6] D.H. Yu, S.H. Yang, J.C. Do and C.B. Lee, " Analysis of Tropospheric Zenith Path Delay of GPS Code Based Precise Time Comparison Technique," *Journal of The Korea Society of Computer and Information* Vol. 17, No. 9, pp. 61- 69, September 2012.
- [7] Torben Schüller, "On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation," Ph. D. dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2001.
- [8] A.E. Niell, "Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B2, pp. 3227-3246, Feb. 1996.



유동희 (Dong-Hui Yu)

부산대학교 전자계산학과 이학박사  
한국전자통신연구원 연구원  
현 부산가톨릭대학교 소프트웨어학과 교수  
※관심분야 : 정보통신, 시각 동기, GNSS 항법 시스템, ICT 융합