

위성항법시스템의 신뢰성 향상을 위한 전리층 폭풍 효과에 관한 기본 연구

Preliminary Study on Ionosphere Storm Effects for Integrity Enhancement of Global Navigation Satellite Systems

양태형*, 손준호, 김정래 (한국항공대학교), 이은성, 이영재 (건국대학교), 전향식, 주정민, 남기욱 (한국항공우주연구원)

I. 서론

SA(Selective Availability)가 해제된 후 GPS(Global Positioning System) 사용량이 급증하고 점차 GPS를 이용한 분야들이 증가하고 있으며, 항공기용 항법 시스템에서도 GPS를 이용한 연구들이 활발히 진행 중이다.

GPS를 이용한 위성항법 시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)에서 몇몇 저해요인들이 발견 되고 있으며, 그중 전리층에 의한 신뢰도 저하가 큰 문제로 야기되고 있다.

전리층(ionosphere)은 대기 구성 물질의 이온화 정도에 따라 구분되는 지표면 상공 50km부터 1000km 사이에 분포되어 있는 층으로 GPS등의 GNSS 신호전파에 영향을 준다. 이중주파수(Dual Frequency) GPS 수신기에서는 두 개의 주파수(L1/L2)를 이용하여 전리층 지연 효과를 제거할 수 있지만 단일주파수 수신기는 보정신호나 전리층 모델을 이용하여 전리층 지연 효과를 제거하게 된다. 높은 정밀도와 신뢰성이 요구되는 항공기용 위성항법시스템의 단일주파수 수신기에서와 같은 장비에서는 보정작업이 반드시 필요하다.

단일주파수 GPS 수신기에서 보정작업은 지상국에서 보정데이터를 송신해 줌으로써 가능한데, 이때 전리층 폭풍이 발생하게 되면, 보정데이터에 문제를 유발하게 된다.

본 논문에서는 전리층에 의한 신호 지연 및 전리층 폭풍 등에 대해 살펴본 뒤, 전리층 지도에 대해 살펴보았다. 또한, 전리층 폭풍이 항공기용 위성 항법시스템에 미치는 영향 및 연구 방향에 대해 살펴보았다.

II. 전리층 폭풍

2.1. 전리층

전리층은 태양에서 복사되는 자외선, 중성자, 미립자등이 지구상층부의 대기를 전리하여 이온화된 음이온이 밀집된 층이다. 전리층의 구분은 자유전자의 밀도 분포와 이온화 정도에 따라 D층, E층, F층으로 구분되며, F층은 F1층과 F2층으로 나누어 진다. 전리층에서 자유전자의 밀도는 고도 300km~500km 근방에서 최대값을 가지며, 밤보다 낮에 자유전자의 밀도가 높아 경계고도가 밤과 낮에 따라 변화한다.

2.2 전리층 신호지연

전리층에서는 태양광의 자외선 입자가 원자들의 결합을 파괴함으로써 발생된 입자들이 전자파의 진행에 영향을 주고 이로 인해 전파지연 효과가 발생하게 된다.

또한, 전리층은 주파수의 차이에 따라 굴절률이 변화하는 특성을 가지는 매질로서 신호지연은 주파수의 함수로 표현할 수 있다. GPS 신호의 경우 전리층은 코드에 의한 의사거리(Pseudorange) 측정값은 증가 시키지만, 반송파(Carrier Phase)에 의한 의사거리는 이와 반대로 감소시키게 된다. 거리 오차는 주파수 제곱에 반비례 하는 식으로 가정할 수 있다.

GPS 위성신호에 대한 영향은 전자 밀도를 전자파 경로를 따라 적분하여 $1m^2$ 면적의 수직 기둥 내에 포함된 전자의 개수를 나타내는 TEC(Total Electron Content)에 비례하는 시간지연으로 나타내게 된다. TEC은 신호 경로상의 총 자유 전자수를 의미한다. 단위로는 TECU를 사용하는데, 1 TECU는 1 평방미터에 10^{16} 개의 전자가 들어있는 것을 의미 하고 이 값을 L1 신호 거리로 환산하면 0.16m에 해당한다.

전리층에 의한 신호 지연 오차가 주파수

제곱에 반비례하는 것을 응용하면 이중 주파수(Dual frequency) 신호를 사용하여 지연크기를 측정할 수 있고, 이를 제거할 수 있다.

2.3 전리층 폭풍

코로나 물질의 방출과 플레어(flare)등의 태양 활동으로 인해 방출된 하전 미립자는 우주 공간을 통해 지구에 도달하여 지구 자계의 작용으로 인하여 굴절되고 극지방 상공에 집결하게 된다. 지구-태양 상호 작용이 활발할 경우 지구주위의 가속된 전자가 지구 자기력선을 따라 남하하여 지구 자계에 영향을 주게 되는데, 이를 지자기 폭풍(Geomagnetic storm)이라 하며, 지자기 폭풍의 발생 및 크기는 태양 활동 과 밀접한 관련이 있다.

발생된 지자기 폭풍에 수반하여 발생하는 전리층의 교란이 수 시간에서 수 일간 계속되는 현상을 전리층 폭풍(Ionospheric Storm)이라

negative 폭풍효과로 구분한다.

고위도 상공에 존재하는 오로라 영역 (auroral oval)은 태양으로부터 분출되는 전하와 지구 자기장의 상호작용으로 형성 된 것으로, 전리층 분포와 밀접한 관련이 있다.

지자기 폭풍과 관련이 있는 지자기장 세기(Geomagnetic index)는 주로 고위도 지방에 위치한 지상 관측소로부터 수집한 정보를 이용하여 나타내는데, Kp를 사용할 경우 0에서 9까지의 범위를 가지며 6이상일 경우 강한 지자기 폭풍의 발생을 의미한다.

그림 1은 전리층폭풍이 발생할 때 전지구적인 TEC 분포를 나타내고 있다[1].

III. 전리층 신호지연 모델

3.1 전리층 지도

전리층에 의한 신호 지연의 크기를 위치 별로 표시한 것을 전리층 지도라고 하는데, 일반적으로 GPS 위성에서 수신기까지의 전파경로에 따라 분포하는 전자밀도를 적분 한 TEC 값으로 표시한다[2,3].

TEC은 GPS 신호의 이온층 지연정도를 결정 하는 중요한 요소로서 TEC을 분석 하여 위치정확도를 향상시킬 수 있으며 특정 지역의 전리층 분포를 파악할 수 있다.

전리층 지도는 2차원 및 3차원 지도가 있으며[4], WAAS등 보정항법 용도에는 주로 2차원 모델을 사용한다.

3.2 IPP (Ionosphere Pierce Point)

2차원 전리층 모델은 전리층을 하나의 얇은 단일층(Layer)으로 가정하는데 단일층 이 있는 특정한 고도는 보통 300km에서 500 km 사이로 설정한다. GNSS 위성으로 부터 수신기까지의 시선방향의 연결선이 단일층과 만나는 점을 IPP (Ionosphere Pierce Point)라고 정의하며, 수신기와 GPS 위성의 위치로부터 계산할 수 있고, 그림 2에 도시되어 있다[2,3].

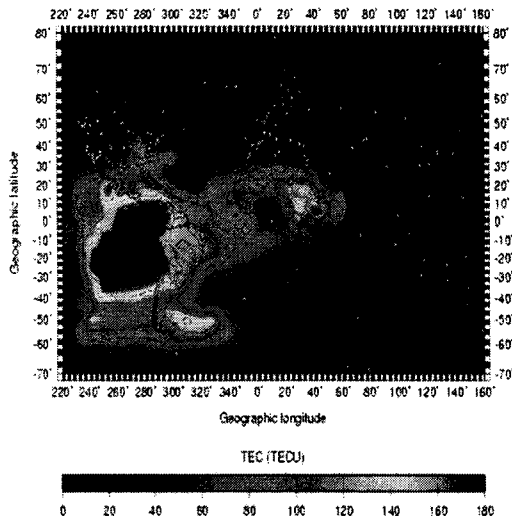


그림 1. 2001년 3월 31일(19:30 UTC)

전리층 폭풍시의 TEC 분포 [1] 한다. 이렇게 유발된 전리층 폭풍은 전리층의 밀도 분포, 전자의 양 및 전리층의 유동체계에 거대한 교란을 유발 하며, 통신위성 신호 교란이나 전력 체계 교란 등 많은 문제를 야기한다.

전리층 폭풍이 시작되면 낮은 고도 전반에 걸쳐 밀도변화가 나타나고 폭풍이 멈춘 이후에도 오래 지속된다. 밀도가 증가하는 것을 positive 폭풍효과, 밀도가 감소하는 것을

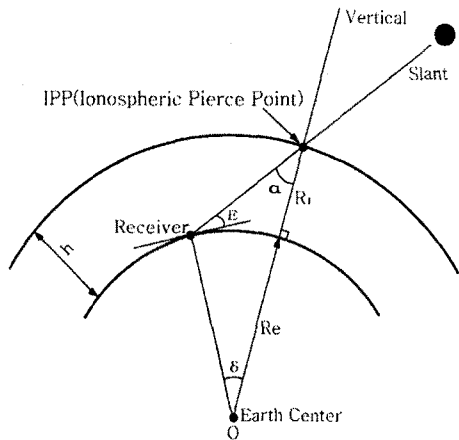


그림 2. 전리층과 IPP의 기하학적 관계

GPS 신호는 임의의 입사각을 가지고 전리층을 통과하게 되며, 지연 정도는 입사각의 함수이다. 그러나 전리층 분포를 일반적으로 표현할 때에는 수직으로 입사했을 때의 전리층 지연량을 기준으로 하게 된다. 이러한 변환을 위해서 mapping 함수 또는 obliquity factor를 사용하는데, 이는 임의의 입사각으로 통과한 전리층 지연량 (Slant TEC, STEC)과 수직으로 입사한 전리층 지연량 (Vertical TEC, VTEC) 사이의 관계를 결정해주는 함수이다. 2차원 전리층 지도는 수직 지연값을 사용하여 표시한다.

3.3 전리층 지연 모델

전리층 지연 모델은 크게 함수 (Function-based) 모델과 격자 (Grid-based) 모델로 구분되는데, 전자는 수학적함수의 형태로 표현한 것이고, 후자는 격자로 구분한 뒤 격자별 지연값을 나타낸 것이다. 함수 모델에는 Polynomial Function 모델과 Spherical Harmonics 모델 등이 있으며, GPS 방송력에 의한 Klobuchar 모델도 이에 포함된다. 이외에 국지적(local)인 모델과 전 지구적(global)인 모델로 나누어질 수 있다.

전 지구적 전리층 모델 들은 전 세계에 분포된 IGS (International GNSS Service) 상시관측소의 데이터 등을 사용하는데, 모델에는 IRI(International Reference Ionosphere), PIM(Parameterized Ionosphere Model), IGS GIM (Global Ionosphere Model) 모델 등이 있다. 이외에 국내에서는 천문우주연구원 에서 자체 9개 상시관측소 망을

사용하여, 매일 2시간 간격의 한반도 전리층 지도를 제공하고 있다[2].

미국 FAA (Federal Aviation Administration)에서 제공하는 WAAS (Wide Area Augmentation System)의 전리층 지도는 미국 전역을 격자점(grid point)으로 나누는 뒤 각 점에서의 VTEC값을 제공한다. 사용자는 전리층 보정을 하려는 각 위성과의 시선방향 벡터로부터 IPP를 계산한 뒤 IPP 주위의 격자점의 VTEC 값을 이용하여 IPP 지점에서의 VTEC값을 계산하고, obliquity factor를 사용하여 STEC값 및 보정값을 계산하게 된다.

보정값보다 중요한 것이 격자점에서의 데이터 신뢰도인데, 각 격자점 별로 GIVE(Grid Ionosphere Vertical Error) 값을 송출하면, 사용자는 이를 이용하여 사용자가 수신하는 GPS 신호의 오차범위를 추정하게 된다. 이러한 격자점의 오차값은 전리층 폭풍이 발생하여 격자내의 전리층 지연 분포가 불균일하게 됐을 때 급격히 증가하므로, 적절한 오차값 계산 및 사용 여부 판단은 매우 중요한 문제이다.

IV. 항공기용 위성 항법 시스템에

미치는 영향

4.1 CNS/ATM

국제민간항공기구 (ICAO)가 차세대 항행시스템으로 채택한 GNSS를 이용하여 정밀 접근 계기비행 및 이·착륙을 수행할 수 있도록 하여 항공기 이·착륙의 안정성 및 효율성을 증대시키기 위한 많은 연구가 진행 중이다.

CNS/ATM (Communication Navigation Surveillance and Air Traffic Management)상의 항법은 향후 항공로에서 전 세계적인 위성항법 시스템이 유일한 항법으로 인정되고 있다. GNSS 수신기 등의 항법장치를 탑재한 항공기에 대해서는 임의로 항공로 등을 설정할 수 있고, 계기착륙장치(ILS)를 전환하여 곡선 진입을 가능케 하기 위해 마이크로파 착륙유도장치(MLS)를 이용한 착륙유도 또는 GNSS 위성으로부터 자기 항공기의 위치를 표시한 정밀진입 방안도 모색되고 있다.

현재 위성항법과 관련된 분야는 해외에서 활발히 연구가 진행되고 있지만 국내에서는 경제적, 기술적 한계로 인하여 다른 분야에 비하여

그 발전이 더디다고 할 수 있다. 위성항행기술과 디지털 데이터 통신기술을 접목한 차세대 위성항행시스템에 대한 본격적인 연구를 위해서는 요소기술들에 대한 철저한 분석과 통합융용기술 개발을 위한 기반기술에 대한 연구가 필요하며 이를 바탕으로 선진국의 개발환경에 동참할 필요가 있다.

4.2 전리층 폭풍에 의한 영향

전리층 폭풍이 발생하면 전리층에 의한 의사거리 지연량이 급격히 변화하기 때문에 모델이나 보정값을 사용하여 지연량을 보정하는 단주파 수신기의 경우 오차가 급격히 증가하게 된다.

LAAS(Local-Area Augmentation System) 등의 DGPS(Differential GPS) 사용시 전리층 폭풍의 존재 여부뿐만 아니라 전리층 폭풍의 이동 속도 및 기준국과 사용자 간의 상대위치가 중요하다. 전리층 폭풍의 속도는 수 백 m/s 정도까지 도달하는데, 이는 일반적인 항공기 최종 접근 속도(70m/s)를 능가하며, 특정한 조건에서 심각한 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 그림 3과 같이 전리층 폭풍의 경계가 사용자(항공기)와 기준국 사이에 위치하여 사용자 관측값에만 영향을 주고 기준국에는 영향을 주지 않을 경우, 사용자 위치오차는 급격히 증가하게 된다.

WAAS의 경우 격자점 내에 전리층 폭풍이 발생하면 격자점 내 데이터의 균질성이 급격히 감소하므로 격자점에서의 보정값 오차범위(GIVE, Grid Ionosphere Vertical Error) 및 위치오차를 증가시키게 된다.

항공기 이착륙의 경우 VPL(Vertical Protection Limit)을 계산 하여, 오차 범위를 설정

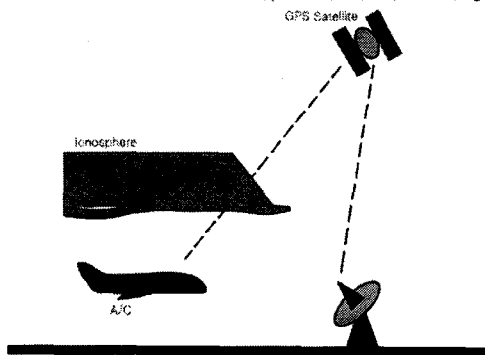


그림 3. 항공기의 위치오차 유발

하는데, GIVE값이 증가할 경우 VPL이

증가하게 된다. 이 경우 설정된 VAL(Vertical Alert Limit)을 초과하는 경우가 발생할 수 있는데, 이는 가용성 (Availability)의 감소를 의미한다.

즉, 전리층 폭풍 발생시 GIVE값을 증가시키면 신뢰성(Integrity)은 증가하지만, 가용성이 감소하므로 적절한 GIVE값 설정이 중요하다 할 수 있다.

우주환경 예보 및 전리층 지도의 실시간 분석을 통해 전리층 폭풍 예보를 하는 것은 어느 정도 가능하지만, 잦은 경보 및 이에 따른 위성항행시스템의 가동률 저하는 시스템의 가용성을 떨어뜨려 결국 전체적인 효용성을 떨어뜨리게 된다. 그러므로 예보뿐만 아니라 전리층 폭풍 발생 시 신뢰성을 저하시키지 않으면서 가용성을 확보하는 것이 큰 문제라고 할 수 있다.

4.3 전리층 폭풍 분석 방법

전리층 폭풍에 의한 영향 분석을 위해서는 우선 전리층 폭풍의 발생 빈도 및 경향 등을 파악할 필요가 있는데, 이를 위해서는 특정 관심 지역에 대한 장기간에 걸친 전리층 지연량 분석을 통하여 위치, 시간대 및 계절별 데이터 베이스를 구축할 필요가 있다.

전리층 폭풍의 경향 등에 대한 연구를 바탕으로 다양한 조건에서 DGPS에 어떠한 영향을 미치는 지를 파악해야 하는데, 이를 위해서는 시뮬레이션을 통한 해석 방법을 주로 사용하게 된다.

LAAS 시뮬레이션의 경우 전리층 폭풍의 모델을 만들어서 다양한 이동 경로와 속도에 대해 항공기 위치 오차에 미치는 영향을 분석한다. 전리층 폭풍의 모델을 위해서 폭풍 특성을 전리층 지연 경사각, 경사각 폭, 경사각 진행 속도 등의 항목으로 분류 하여 모델링하기도 한다.

일례로 Stanford 대학의 Luo 등이 수행한 시뮬레이션[5]은 지상국과 항공기 수신기의 전리층 폭풍 감지 기능 여부에 따라 몇 가지 경우로 나눈 뒤 각각의 오차 및 감지 시간 등을 분석하였다.

이러한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 GPS 의사거리 관측값 및 이에 의한 위치 추정값을 시뮬레이션 할 수 있는 기능이 필요하며, 상시관측소 데이터 분석 등을 통한 전리층 폭풍 경향 파악 및 적절한 모델링이 필요하다.

V. 결론

현재 위성항법시스템의 항공기 응용을 저해하는 가장 큰 요소로 전리층 폭풍 영향 분석에 대한 연구 필요성이 크게 부각되고 있다. 차후 GPS 현대화계획이 완성되고, GALILEO 등이 본격 운영되면, 전리층 지연 및 폭풍에 대한 영향이 크게 감소하지만, 모든 사용자 수신기에 이를 적용하기에는 상당한 시간이 소요될 것이므로, 상당기간 전리층 폭풍은 주요 연구 분야가 될 전망이다.

국내에서 개발 및 운용할 항공용 위성항법시스템의 가용성을 높이기 위해서는 우선 한반도 상공의 전리층 폭풍 발생 경향을 파악할 필요가 있다. 또한, 과거 대기과 우주환경 데이터를 분석하고, 전리층 지도를 이용하여 발생 빈도, 세기 등을 파악하여야 하며, 검증을 위해서 Global Model등과 비교하는 것이 필요하다.

전리층 폭풍 발생 경향에 관한 연구를 바탕으로 항공용 위성항법시스템의 신뢰성, 가용성에 미치는 영향 등을 시뮬레이션이나 시험 등을 통한 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

1. Mariangel Fedrizzi "Monitoring the response to Geomagnetic Storms using GPS Total Electron Content measurements" Sapporo, Japan, IUGG 2003. July 3.
2. 최병규, 박종욱, 박필호, "한반도 상공의 준실시간 전리층 모델 개발", GNSS 기술협의회 Workshop, 2004.11
3. 한재호, 임삼성, "GPS 정밀도 향상을 위한 전리층 지연 효과에 관한 연구", 10차 GNSS Workshop, 2003년 9월, pp. 441-445
4. Kee, C., Sohn, Y., and Park, J., "Modified Tomographic Estimation of the Ionosphere Using Fewer Coefficients", Institute of Navigation's GPS/GNSS Meeting, September 2003, Portland, OR, USA
5. Luo, M., et. al., "LAAS Ionosphere Spatial Gradient Threat Model and Impact of LGF and Airborne Monitoring", ION GPS/GNSS Meeting, September 2003, Portland, OR, USA.