

우주전파환경 관측자료 데이터 연계방안에 관한 연구

2012. 12. 31.

제 출 문

본 보고서를 「우주전파환경 관측자료 데이터 연계방안에 관한 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2012. 12. 31.

연구책임자 : 최문용(우주전파센터 연구개발팀)

연구원 : 이환상(우주전파센터 연구개발팀)

문준철(우주전파센터 연구개발팀)

양동훈(우주전파센터 연구개발팀)

요 약 문

본 연구에서는 국내 기관에서 운용중인 우주전파환경 관측자료를 연계하여 우리나라 전역에 대해 보다 정확한 전리층 변화 영향 분석 및 예측하기 위한 방안을 연구하였다.

우선 전리층 개념을 조사하고 레이더, 위성, 예측모델을 통한 전리층 관측 방법을 조사하였다. 또한 한국천문연구원, 국토지리정보원, 위성항법중앙사무소에서 운영 중인 GPS 관측소를 연계하여 우주전파센터에서 전리층 관측 자료를 통합 수집하도록 하였다. 통합 수집된 자료를 기반으로 우리나라 전역에 대한 전리층 총 전자량, 연간 변화량, 시간당 총 전자량 변화값 등을 우주전파센터 홈페이지를 통해 정보를 제공하도록 하였다. 그리고 단파통신을 위한 실시간 최적주파수 제공을 위한 방안을 제시하였다. 첫째는 전리층 관측장비 측면에서는 예산절감 및 부지 확보를 고려하여 사업사 관측을 통한 전리층 관측 기술 및 시스템 개발을 수행하여야한다. 둘째로 전리층 예측모델 측면에서는 최근 발표된 IRI-2012에 국내 관측자료를 기반의 동화모델을 개발하여 실시간 전리층 분석 및 예측할 수 있도록 하여야한다.

본 연구를 통해 국내 기관의 GPS 관측소를 연계하여 우리나라 전역에 대한 전리층 총전자량 등 전리층 정보를 제공함에 따라 군, 위성, 항공사 등 다양한 수요기관에서는 보다 정확하고 실질적인 전리층 정보를 이용할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 제시된 단파통신을 위한 실시간 최적주파수 방안을 통해 우주전파센터는 향후 국내 및 아태지역에 단파통신 최적주파수를 실시간 제공이 가능해짐에 따라 항공사 및 군 등 수요기관은 보다 정확한 단파통신 주파수를 사용할 것으로 사료된다.

SUMMARY

In this study, We collected cosmic radio environment observation data through the network of domestic institutions and proposed the plan of the optimum frequency for HF communication.

We investigated the ionospheric characteristics and the way of ionospheric observation by radar, satellite, prediction model. we configured the network of Korea Astronomy and Space Science Institute(KASI), National Geographic Information Institute(NGII), DGPS Central Office and Korea Space Weather Center. Korea Space Weather Center collected GPS observation data of 66 sites by this network and service TEC map and ionospheric disturbance of the Korea ionospheric by web site.

We suggested the plan of the optimum frequency for HF communication. First, we proposed that Korea Space Weather Center will develop to observation techniques of the oblique ionospheric throughout Korea. Secondly, we proposed that Korea Space Weather Center will develop to a assimilation model for the analysis and forecasting of real-time ionospheric status.

목 차

제1장 서론	9
제2장 전리층 개념 및 관측방법	10
제1절 전리층 개념 및 구분	10
제2절 전리층 관측방법	13
제3장 국내 GPS 관측데이터 연계 및 서비스 제공	32
제1절 배경	32
제2절 국내외 GPS 정보제공 서비스 동향	32
제3절 국내 GPS 관측데이터 연계	41
제4절 홈페이지를 통한 서비스 제공	42
제4장 단파통신 최적주파수 실시간 제공 방안	46
제1절 배경	46
제2절 단파통신을 위한 전리층 관측 현황 및 문제점	46
제3절 단파통신 최적주파수 실시간 제공 방안	54
제5장 결론	58
참고문헌	59

표 목 차

[표 2-1] IRI 모델의 입력 요소와 산출 결과 요소	31
[표 4-1] 전리층 관측시스템(DPS-4D)	48

그 립 목 차

[그림2-1] 고도에 따른 전리층의 낮과 밤의 전자 밀도 분포	11
[그림2-2] EISCAT의 이오노존데로부터 생성된 이오노그램	15
[그림2-3] POLAN에 의한 전리층 고도 계산 처리	17
[그림2-4] DPS-4의 수신기 구성 (#1, #2, #3, #4)	18
[그림2-5] DPS-4 안테나 간섭계에 의한 경로차와 위상차	19
[그림2-6] Multistatic ionosonde로 관측한 시선 방향의 속도 분포	20
[그림2-7] 선형 안테나 배열 안테나 설치된 모습과 배열 모식도	21
[그림2-8] 레이더 이미징을 위한 안테나 간섭계의 배열	22
[그림2-9] 적도 부근에서 L1 주파수의 진폭 신틸레이션	24
[그림2-10] 진폭 신틸레이션과 위상 신틸레이션 예제	25
[그림2-11] 위도와 공간에 따른 전리층 지역의 세분화	26
[그림2-12] GPS 수신기 원리	28
[그림3-1] CODE의 총전자량 전지구 맵 모델 결과	33
[그림3-2] ESA/ESOC의 총전자량 전지구 맵 모델 결과	34
[그림3-3] JPL의 총전자량 전지구 맵 모델 결과	34
[그림3-4] 미국 NOAA/SWPC에서 제공하는 총전자량 맵 모델 결과	35
[그림3-5] IGS 망에 제공하는 NRCAN GPS 관측소	36
[그림3-6] NRCAN의 총전자량 맵 모델 결과	36
[그림3-7] 호주 IPS의 1시간 평균 전지구 GPS 총전자량 맵 모델 결과	37
[그림3-8] 호주 IPS에 제공하는GPS TEC 맵의 예시	37
[그림3-9] 호주의 지역적 총전자량 맵과 모델 결과의 비교	38
[그림3-10] 한국천문연구원 GPS 관측소 현황	39
[그림3-11] 국토지리정보원 GPS 관측소 현황	40
[그림3-12] 위성항법중앙사무소 GPS 관측소 현황	40
[그림3-13] 국가기관 GPS 관측소 연계망 구축	41
[그림3-14] GPS 총전자량 2차원 산출 모델 개념도	42
[그림3-15] 우리나라 상공 실시간 GPS 총전자량 맵	43

[그림3-16] 연간 GPS 총전자량 변화 추이 분석 그래프	44
[그림3-17] GPS 총전자량 Disturbance 맵	45
[그림4-1] 전리층 관측시스템(DPS-4D)	47
[그림4-2] Ionosonde 관측 그래프	51
[그림4-3] 영국의 사입사 전리층 관측시스템 및 관측 결과	52
[그림4-4] VOACAP 입력 파라메타	54
[그림4-5] IRI모델에 Ionosonde 관측자료를 이용한 자료동화 IRI 모델	56

제1장 서론

태양활동은 약 11년 주기로 극대기를 맞이하는데 2013년부터 극대기가 시작할 것으로 예측되고 있다. 이러한 태양활동 극대기에는 태양흑점 폭발 빈도가 높아지게 되며 이로 인해 X선, 고에너지입자, 코로나 입자 등이 지구로 날아와 전리층 교란, 위성체 오동작, 지구자기장 교란 등을 일으킨다. 특히 X선은 전리층을 교란하여 단파통신 및 위성통신 장애를 일으켜 혼란을 초래하게 된다.

전리층은 고도 60km부터 1000km에 이르는 고층대기 영역으로 태양으로부터 오는 X선 등이 고위도 지역으로 유입되어 지구 중성대기 일부가 이온화되어 플라즈마 상태로 존재하는 영역을 말한다. 전리층은 다수의 중성입자들과 극소수의 이온화된 입자들로 구성되어 있는데, 이온화된 입자들이 이곳으로 입사되는 전파 및 이 영역에서 운용되는 저궤도 위성에 영향을 미치게 된다. 이에 따라 미국, 유럽 등 세계 각국에서는 전리층 교란 영향 분석 및 예측 연구를 통해 대국민 서비스를 제공하고 있다.

따라서 본 연구를 통해 태양활동에 따른 전리층 교란 영향 및 예측을 위해 전리층 관련 국내 기관과 연동망을 구축하여 전리층 관측자료를 통합 수집하고자 한다. 또한 수집된 자료를 통해 우리나라 전리층 GPS 총전자량 정보 제공하고 단파통신을 위한 실시간 최적주파수 제공을 위한 방안을 제시하고자 한다.

2장에서는 전리층 개념을 조사하고 레이더, 위성, 예측모델을 통한 전리층 관측방법을 조사하였다.

3장에서는 전리층 관련 국내 기관과 네트워크 연계를 통한 GPS 관측자료 연계망을 구축하고 통합된 자료를 가공하여 우주전파센터 홈페이지에 관련 자료를 표출하여 실시간 전리층 정보 제공 결과를 서술하였다.

4장에서는 현재 우주전파센터에서 운용중인 전리층 관측장비와 및 예측모델 현황 및 문제점을 분석하고 단파통신 최적주파수 실시간 제공을 위한 방안을 제시하였다.

5장에서는 본 연구결과를 정리하고 우주전파센터에서 향후 제공할 전리층 관련 서비스 방향을 제시하였다.

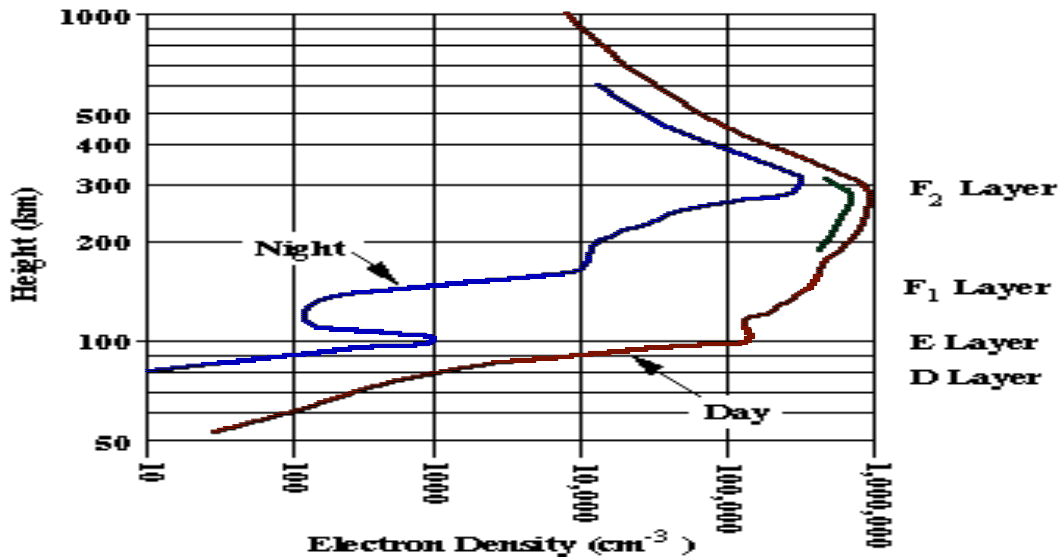
제2장 전리층 개념 및 관측방법

제1절 전리층 개념 및 구분

1. 전리층 개념

전리층(ionosphere)은 고도 60km부터 1000km에 이르는 고층대기 영역으로 태양으로부터 오는 자외선, 극자외선 및 X선이나 자기력선을 따라 고위도 지역으로 유입되는 고에너지 입자들에 의해 지구 중성대기가 일부 이온화되어 플라즈마 상태로 존재하는 영역이다. [그림2-1]에서와 같이 전리층은 크게 D, E, F1, F2 층으로 분류되며 “층(layer)”이라는 용어는 고도에 따라 전리층의 전자밀도가 밀집한 곳이 존재함을 의미한다. [그림2-1]은 고도에 따른 전리층 전자밀도 분포를 나타낸다.

전리층이라는 명칭은 전리층 존재가 알려진 초창기에 HF(High Frequency)파가 반사되는 층을 E층이라고 명칭한 후에 과학의 발전에 따라 그 성질이 E층과 구분되는 영역을 영문자 순서대로 D층과 F층으로 나누며 이를 다시 F1층과 F2층으로 나누었다. D층은 고도 상승에 따라 전자밀도가 급격하게 증가하여 최대 전자밀도는 태양의 복사량이 최대가 되는 태양 정오 이후에 일어나며 태양의 복사량이 최저가 되는 밤에는 밀도가 급격하게 낮아진다. D층의 전자밀도는 여름에 가장 크며 계절적 변화 또한 매우 심하다. 그리고 태양의 X선이 지배적인 원천이 되는 70-90km의 범위에서 태양활동 극대기 때 전리율이 최대가 된다. 태양활동의 극소기일 때는 70km이하에서 우주선에 의한 전리가 매우 지배적이다. 지자기 폭풍이 회복기에 접어드는 조용한 날에는 복사벨트(radiation belt)로부터 강력한 전자의 낙하가 발생되어 전자밀도가 상승한다. E층은 90~130km의 범위이다. 이 부분은 태양의 천정각에 강하게 의존하기 때문에 낮과 밤의 밀도차이가 크다. 또한 이 부분에는 스포레딕 E라고 불리는 것들이 나타나는데, 이것은 국지적으로 전자밀도가 주위보다 가끔 몇 배씩 높아지는 현상을 일컬으며 중위도에서는 여름의 낮 시간에 가장 빈번하게 일어난다.



[그림 2-1] 고도에 따른 전리층의 낮과 밤의 전자 밀도 분포

F층은 130km이상의 상공의 영역을 나타내며 수직전자밀도의 윤곽으로 F1층과 F2를 구분하고 있다. 그러나 야간에는 전리층에서의 전자 발생에 크게 기여하는 태양 복사의 소멸로 이러한 구분이 되지 않고 있다. F2층의 전자밀도는 낮과 밤의 차이가 약 100배로서 주간에는 $10^{12}/m^3$ 이고 야간에는 $5 \times 10^{10}/m^3$ 정도의 값을 가진다. E층과 F층은 HF 통신에서 무선파를 반사하는 역할을 하기 때문에 장거리 육상 및 해상 통신에 사용되고 있으며, D층에서는 VLF와 ELF파가 반사되지만 HF파는 신호감쇠를 일으키는 흡수 역할을 하고 있다. GIS와 같은 중요사업에 사용되는 GPS위성에서 보내는 신호는 전리층을 통과하면서 시간적 지연으로 인하여 위치정밀도를 낮추기 때문에 전리층에 대한 연구가 매우 중요하다.

2. 전리층 구분

가) D층

D층은 대체로 50~90km의 범위에 걸쳐 있는데, 이 부분의 전자밀도는 고도의 상승에 따라 급속도로 증가한다. D층은 낮과 밤의 전자밀도 변화가 상당히 크다. 이 편차는 고도간격 70~90km 사이에서 가장 크며 일반적인 최대 전자밀도는 108~109 electron/m³이다. 또한 D층의 전자밀도는 계절의 변화에 따라 뚜렷하게 변하는데, 여름에 최대값을 가지며 겨울에 최소값을 가진다. 70~90km 지점에서는 태양의 X선이 이온화에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 이온화율은 태양 주기의 최고점에서 가장 크다.

나) E층

E층은 고도 90~130km 범위를 일컫는다. 이 층은 Chapman모델에 근사하게 따르는 규칙적인 층으로, 전자밀도는 태양의 천정각에 따라 크게 변화하며 최대 전자밀도는 정오 가까이에서 나타난다. 최대 전자밀도의 고도는 약 110km이고, 약 3MHz의 최대 플라즈마 주파수가 0.4~0.6MHz까지 떨어진다. 또한 E층은 태양의 극대기에서 최대밀도를 보인다. 또한 이 부분에는 스포래딕 E라고 불리는 것들이 나타나는데, 이것은 국지적으로 전자밀도가 주위보다 가끔 몇 배씩 높아지는 현상을 일컬으며 중위도에서는 여름의 낮 시간에 가장 빈번하게 일어난다.

다) F층

F층은 130km이상의 상공이다. F층은 F1층과 F2층으로 나눌 수 있는데 이 구분은 낮에만 나타난다. F1층은 최대 전자밀도가 $2 \times 10^{11}/\text{m}^3$ 인 130~210km 고도 범위이다. E층처럼 F1층은 Chapman 모델에 유사하게 따르지만 태양의 천정각 의존성은 E층과 다르다. F2층은 전자밀도가 가장 크게 나타나는 지역으로 낮의 $10^{12}/\text{m}^3$ 부터 밤에 $5 \times 10^{10}/\text{m}^3$ 까지 걸쳐있다. F2층은 바람, 확산 그리고 다른 역학적인 효과 등에 의한 영향이 강하기 때문에 Chapman 공식에 의해서 잘 나타낼 수 없다.

제2절 전리층 관측방법

전리층의 전자밀도 분포는 [그림2-1]에서 보이는 것처럼 밤과 낮이 다르게 나타나고 태양 활동, 지자기 활동, 계절 등에 의해 변한다. 이에 따라 지상 전파통신 장애나 GPS 위성 신호의 시간오차 또한 전리층의 상태에 민감하게 변화하기 마련이다. 이러한 전리층의 상태를 연구하는 방법으로는 크게 다음의 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 지상에 설치된 레이더(radar)를 이용하여 전리층에 반사되는 전파를 관측하는 방법으로 특정지역에서 장기간 관측 자료를 축적하는 장점이 있다. 둘째, 로켓이나 인공위성을 이용하여 이온층 내에서 현장 관측(in-situ measurement) 하는 방법으로 첫 번째 방법에 비해 정확한 자료를 얻을 수 있고 여러 지역을 관측할 수 있으나 장기간의 관측이 불가능하다. 셋째, 경험적 또는 물리화학적 이론 모델을 통해 대표적인 전리층 상태를 관측된 자료와 비교하는 방법이 있다.

1. 레이더를 이용한 전리층 관측

전리층을 관측하는 레이더는 송신기와 수신기의 구성에 따라 레이더의 종류가 구분할 수 있다. 송수신기가 각각 1대씩 있어 전파 신호를 송수신하여 관측하고자 하는 영역의 플라즈마 밀도와 고도를 특정할 수 있는 것은 monostatic radar라고 하고, 여러 대의 수신기로 beam forming 방법을 이용하여 속도 등을 측정할 수 있는 것을 multistatic radar라고 부른다.

최근 들어 이오노존데를 비롯한 많은 레이더들이 multistatic radar 방식을 채택하여 전리층의 이온 밀도 뿐만 아니라 이온 속도의 3차원 성분을 직접 도출함으로써 전리층의 전기장 변화를 연구할 수 있게 한다. 대표적인 multistatic radar로는 극지방 EISCAT의 triastatic radar로서 1대의 송신기에 3대의 수신기로 구성되어 있으며 이온 속도를 3차원 성분으로 얻어낼 수 있다.

또한 송수신기의 개수에 따라 레이더 장비가 분류되었는데 레이더 안테나 배열을 조합하여 단순한 전파 신호 이상의 신호를 분리하여 전리층 연구에 이용하기도 한다. 레이더에서 안테나의 기하학적인 배치와 수신기와의 조합을 통해 다양한 과학적인 결과들을 얻어낼 수 있다. 종전의 coherent

radar의 경우에 자기장방향으로 정렬된 밀도 불균질면의 신호를 시간과 높이에 따른 변화 뿐만 아니라 안테나의 간섭 배열과 여러대의 수신기를 이용하여 레이더를 이용한 이미징을 하기도 한다. 이렇게 이미징을 할 수 있는 레이더를 imaging radar라고 부른다.

가. 이오노존데(Ionosonde)

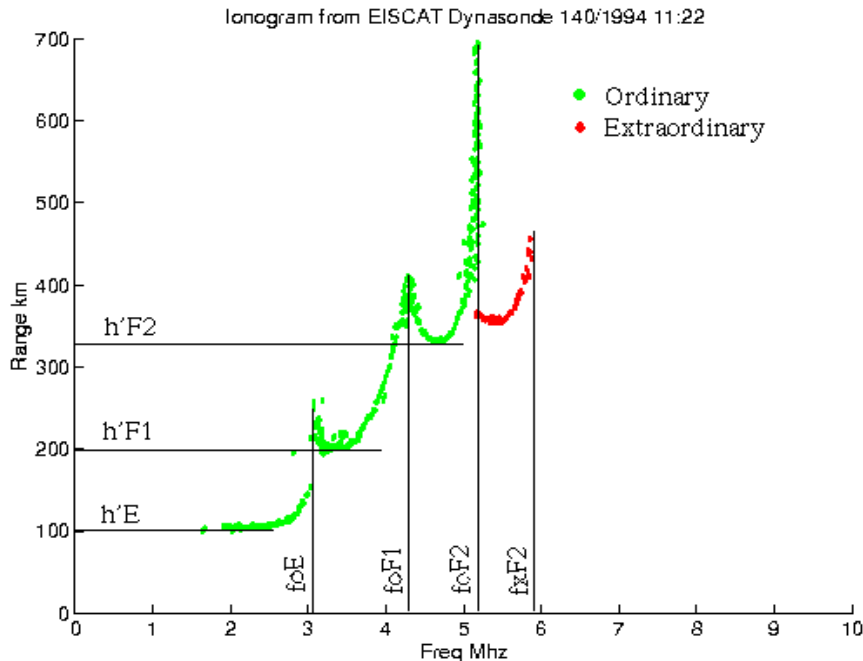
이오노존데는 전파의 송수신으로부터 전리층의 이온 밀도를 관측하는 최초의 기술로 전리층 관측레이더의 원조라고 볼 수 있다. 주어진 주파수에서 송신된 전파가 전리층의 특정 영역에서 반사되어 오는 전파를 수신하여 주파수의 특성과 이에 따른 전리층 플라즈마의 동조 주파수를 이용하여 높이에 따른 전리층의 전자 밀도를 계산하는 방식의 레이더이다. 3~30 MHz의 주파수를 스캔하여 차례로 송신하고 이에 따른 수신 전파를 분석하여 가상 고도에 따른 플라즈마 밀도를 계산하며 모형 계산을 통해 가상고도에 해당하는 내용을 실제 고도로 변환한다. 이러한 변환작업을 통해 이오노존데는 최대밀도와 고도 NmF2, HmF2를 생성하며, 이 물리량은 이오노존데의 대표적인 물리량으로서 지역적인 전리층의 변화량의 기후학적 분석을 하는데 이용된다. 이오노존데는 역사가 오래된 기기로서, 전리층의 현재 상태나 지자기 폭풍 등에 의한 급격한 변화를 상시 모니터링해서 감시할 수 있는 장비이다. 이오노존데는 크게 Monostatic 이오노존데와 Multistatic 이오노존데로 나눌 수 있다.

1) Monostatic 이오노존데

Monostatic 이오노존데는 단일 송신기와 단일 수신기로 구성된 고전적인 이오노존데로서, 대표적인 활용예제는 ionogram 이다. 이오노그램이란 이오노존데에서 발사한 전파의 주파수에 따른 도달시간을 그래프로 나타낸 것이다. 하지만 실제로는 특정한 층에서 반사되어 되돌아오는데 걸리는 시간이 결국 반사된 고도를 나타내는 것이므로 이오노그램을 보면 가로축이 주파수(MHz), 세로축이 고도(km)로 나타나는 경우가 많다. 아래 [그림2-2]은 EISCAT 이오노존데에서 생성된 이오노그램의 한 예를 나타낸 것이다.

가공되지 않은 이오노그램에서 전리층의 층별 높이는 가 높이(virtual

height)이다. [그림2-2]에서 아래로 오목한 패턴들이 여럿 나타나는데, 각각의 곡선 마디가 전리층에서 E층, F1층, F2층을 나타낸다. 각각을 구분하는 기준은 수직방향으로 그려진 수렴선이 되며 이 위치가 바로 각 이온층의 임계주파수(critical frequency)에 해당된다. 즉, 아래로 오목한 곡선 패턴의 오른쪽에서 위로 수렴하는 선에 해당되는 x축상의 위치를 말한다.



[그림2-2] EISCAT의 이오노존데로부터 생성된 이오노그램

그리고 곡선 패턴의 최하단에 해당되는 고도는 각 전리층의 virtual height(h')가 된다.

사용되는 전파는 ordinary 모드와 extraordinary 모드 두 종류가 있으며, 각 모드마다 반사되는 층의 높이나 주파수가 서로 다르다. 똑같은 F2층이라 하더라도 o-모드에서의 임계주파수와 x-모드에서의 임계주파수가 다르게 나타나는 것을 [그림2-2]에서 확인할 수 있다. 물론 실제로는 o-모드의 값들이 주로 많이 사용된다. 그래서 $fxF2$ 보다는 $foF2$ 의 값이 자주 등장하는 것이다. 이오노존데에서 발사하는 전파의 주파수는 주로 단파대역인 0.1~30MHz 이

다. 발사하는 주파수가 커질수록 더 높은 고도에까지 침투했다가 반사되어 오는 경향이 있다. 그러다 보면 반사되지 않고 그냥 통과되는 주파수에 도달하게 된다. 이 상황은 두 가지 모드 중 ordinary 모드에서는 주파수가 그 층의 최대 플라즈마 주파수를 살짝 넘어갈 경우가 된다. 그리고 extraordinary 모드에서는 자기장의 효과가 추가되므로 전자 자이로 주파수 (electron gyrofrequency)의 1/2에 해당되는 값이 더해진 주파수에서 이런 현상이 나타나게 된다. 이러한 주파수를 임계주파수라고 하며, 각 모드 별로는 다음과 같이 표현된다.

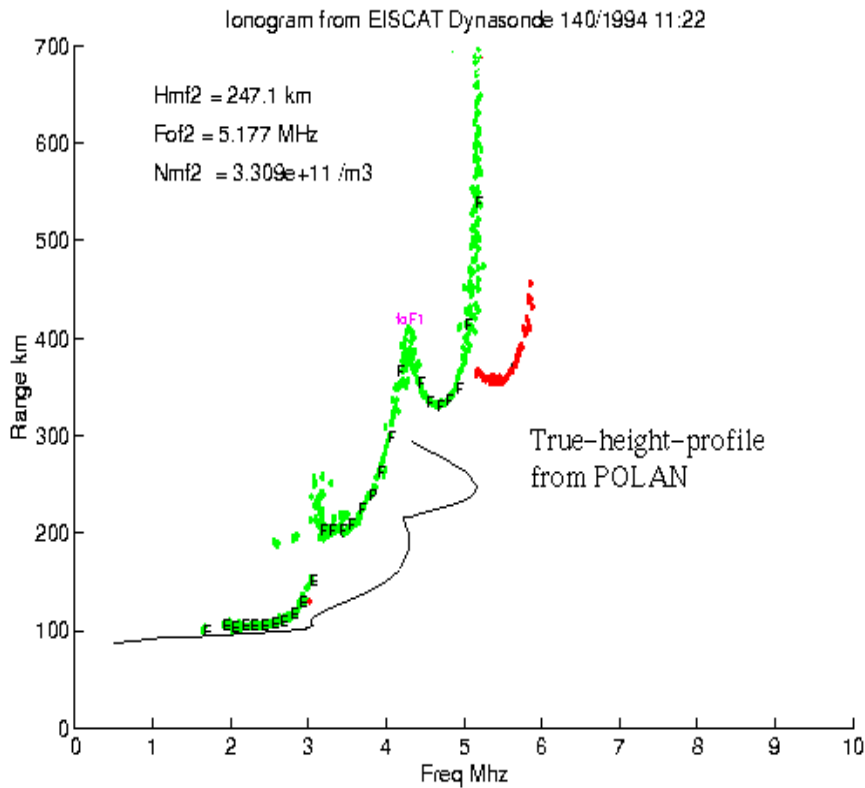
$$f_c = 8.98 \sqrt{N_e} \text{ for ordinary mode} \quad (1)$$

$$f_c = 8.98 \sqrt{N_e} + \frac{0.5Be}{m} \text{ for extraordinary mode} \quad (2)$$

(f_c : 임계주파수(Hz), N_e : 전자밀도(/m³), B : 자기장세기, e : 전자전하, m : 전자질량)

이러한 임계주파수를 넘어서는 전파는 반사없이 그냥 투과하게 된다. 만약 이러한 주파수의 전파가 지나가는 경로상에 다른 이온화된 영역이 있을 경우 이를 통과하는데 좀 더 시간이 걸리게 된다. 그리고 더 큰 임계주파수를 갖는 이온층에서는 반사되어 돌아올 때에도 이러한 지연현상이 일어나게 된다. 따라서 지상에서 이오노존데 관측에 의하여 특정 이온층의 고도를 구한다 하더라도 이것은 가상의 고도, 즉 virtual height가 될 수 밖에 없고 실제 고도는 이보다 더 낮은 경우가 많다. 이렇게 더 낮은 실제고도를 구하기 위해서는 True Height Analysis라는 방법을 동원해야 한다.

이오노그램 자료로부터 가상고도가 아닌 실제고도를 구하는 작업은 그리 단순하지는 않으며, 이러한 작업을 수행하는 응용 프로그램들이 따로 존재한다. 기본적으로는 전파가 지나가는 경로상의 전자밀도의 분포를 이론적으로 가정한 다음 계산을 수행하는 방식을 따른다. 다음 [그림2-3]은 POLAN이라 불리는 프로그램에 의하여 이오노그램 관측자료로부터 실제 고도분포를 얻어낸 예를 보여주고 있다.



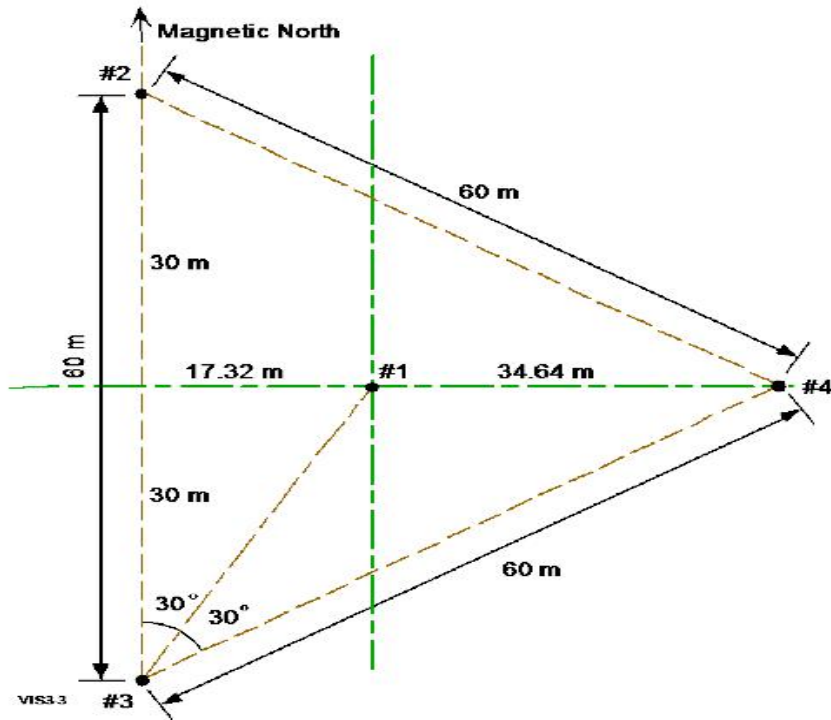
[그림2-3] POLAN에 의한 전리층 고도 계산 처리

2) Multistatic ionosonde

최근의 이오노존데는 종전의 단일 수신기 시스템에서 벗어나 두개 이상의 수신기로서 이오노그램에서 얻는 플라즈마 밀도 정보외에 동역학적인 정보를 얻고 있다.

미국 Lowell 대학에서 개발한 DPS-4모델은 대표적인 Multistatic ionosonde로서 한 개의 송신기와 4개의 수신기를 가진 시스템으로서 [그림 2-4]에서 보이는 것과 같이 경로차와 위상차를 이용하여 반사되는 전파신호의 입사각을 결정할 수 있다. 여러 개의 수신기는 이용하여 입사각을 결정하면 3차원 공간 경로차와 위상차의 조합을 이용하여 상의 이온의 속도를 측정할 수 있다. ([그림2-4]은 네 개의 수신 안테나의 물리적 특성을 보여준다.)

DPS 시스템은 네 개의 안테나 수신기 배열에서 수신된 신호의 입사각을 정의하기 위해 두 가지의 다른 기술을 사용하는데 하나는 디지털 빔 형성을 사용한 상의 분해능 기법이며 다른 하나는 측정 데이터가 후 처리 과정에서 분석될 때 얻게 되는 초 분해능기법 이다.

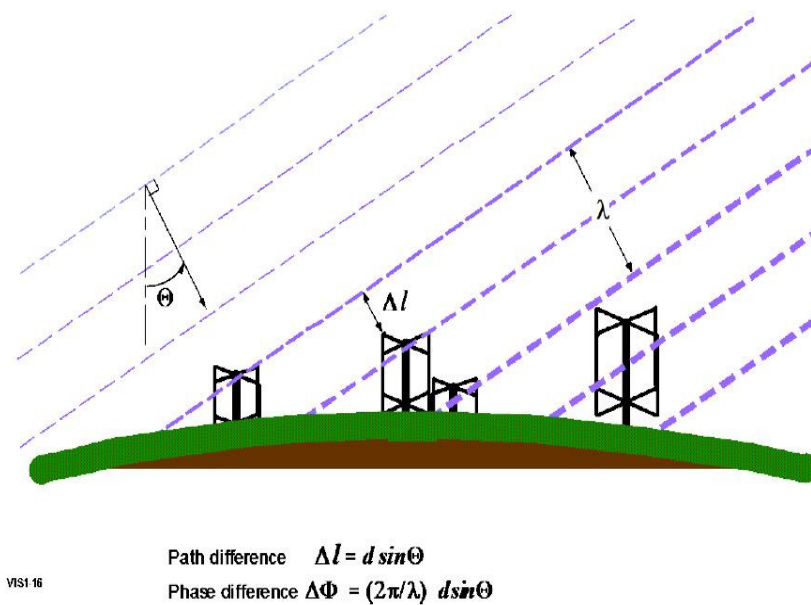


[그림2-4] DPS-4의 수신기 구성 (#1, #2, #3, #4)

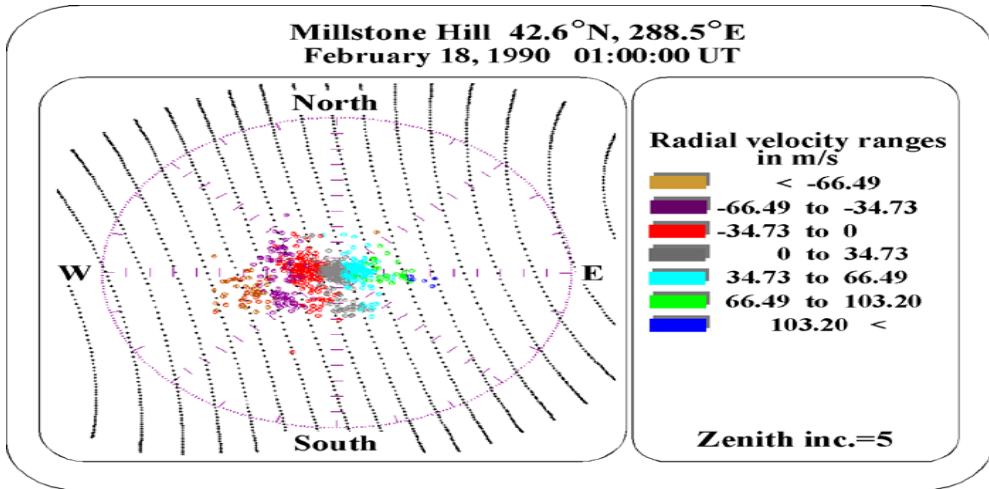
두 가지 기법 모두 간섭계의 기본 원리를 활용하는데 이러한 원리는 [그림2-5]에 나와 있다. 17.3m, 34.6m, 30m, 60m 와 같이 다양한 거리 차이는 여섯 개의 서로 다른 방위각 평면에서 반복된다. 한 방향에 대해 계산한 위상차는 서로 다른 다섯 개의 방향에도 적용된다. 이 여섯 개의 대칭은 이 배열의 여섯 축을 따라 존재하는 여섯 개의 방위각 빔을 정의하는 방법이 사용되며 빔 형성의 계산을 매우 효율적으로 만들어준다. 디지털 빔 형성에 의해 입사각을 찾는 기법은 단순히 각각의 빔에 대한 진폭을 비교하고 가장 강한 빔의 중심 방향을 찾는 것이 된다. 그러므로 이 기법의 정확도는 방위각으로는 30도, 수직으로 15도(여섯 개의 방위 빔은 60도 간격으로 분

리되며 경사 빔의 경우 일반적으로 수직 빔과 30도의 차이를 갖는다)로 제한된다. 그러나 이동 입사각 기법을 이용한 초 분해능 기법은 1도에 근접한 정확도를 얻게 된다.

위의 기법을 활용하여, 도플러 속도 폭과 전체적인 이온의 이동 속도를 계산할 수 있는데, [그림2-6]은 multistatic ionosonde를 이용하여 관측한 사례를 보여 준다.



[그림2-5] DPS-4 안테나 간섭계에 의한 경로차와 위상차



[그림2-6] Multistatic 이오노존데로 관측한 시선 방향의 속도 분포

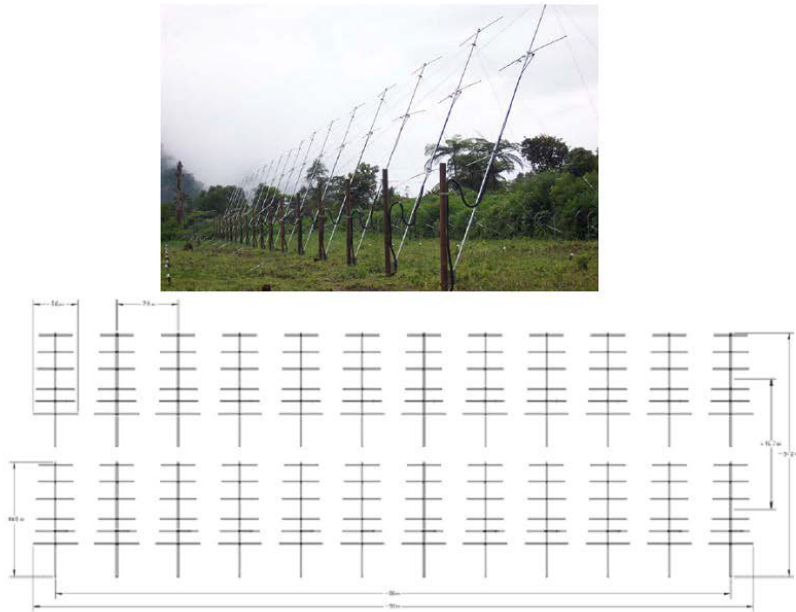
나. 간섭성 산란 레이더(CSR)

간섭성 레이더는 전리층의 E층 혹은 F층에서 빈번하게 일어나는 전자밀도 불균질을 관측하기 위한 기기이다. 전자밀도 불균질로부터 발생하는 도플러 후방산란을 관측하여 고도, 후방산란의 세기, 그리고 도플러 속도 등의 물리량을 얻을 수 있다. CSR(coherent scatter radar)은 통상적으로 27-30MHz 주파수 대역에서 단일 주파수를 사용하므로 주파수 스캔을 하는 이오노존데와 주파수 대역이 다르다. 최대 출력은 20-30kW이며 duty cycle 과는 반비례하는 관계를 가지므로 운영하는 목적에 따라 선택하여 설치 및 관측하는 것이 중요하다.

관측 고도는 70-1000km로서 열권 및 전리권을 모두 포함하며 지자기 위도에 따라 밀도 불균질의 후방 산란이 강한 신호로 나타나는 영역에 따라 Es층이나 F층의 밀도 불균질을 관측할 수 있다.

1) 안테나 선형 배열 간섭계

간섭성 산란 레이더에서 안테나 간섭계의 선정이 매우 중요하다. 안테나의 배열에 따라 송신된 전파의 폭이 결정되며 가장 기본적인 형태는 야기(yagi) 안테나의 선형 배열이다. 안테나의 배열은 송신과 수신에 동시에 사용되는데 선형 안테나 배열의 경우 방위각 방향으로 +/- 30도 빔을 회전하면서 관측하는 것이 일반적이다.



[그림2-7] 선형 안테나 배열 안테나 설치된 모습과 배열 모식도

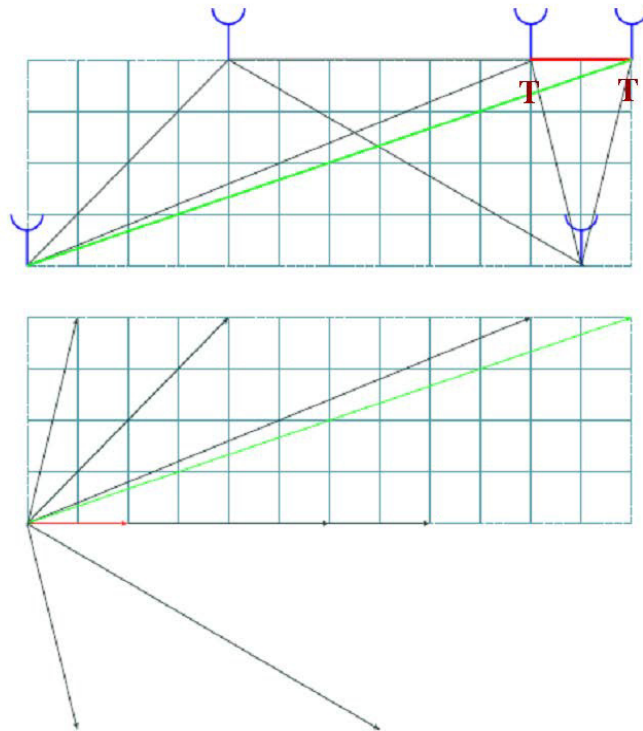
선형 안테나 배열의 특징은 관측 목표 지점 이외의 side lobe를 가능한 작게하면서 빔의 방위각 이동할 때 grating side lobe를 최소화하는 안테나 배열을 고려해야 한다. [그림2-7]은 일반적인 안테나 선형 배열을 보여준다. 나고야 대학의 STEL(Solar-Terrestrial Environment Laboratory)는 저위도 지방의 전리층 연구를 위해 인도네시아 타방 지역에 설치한 CSR과 같은 형태의 안테나 배열이다. 선형 안테나 배열의 경우 지구 자기력선에 수직한 방향으로 안테나 방향을 정렬하여 자기력선을 따라 분포한 밀도 불균질 지역의 전파 신호를 효율적으로 관측할 수 있는 안테나 간섭계이다. [그림2-7]는 선형 안테나 배열시에 나타나는 빔의 형태를 고도와 방위각을 투영해서 보여주고 있다.

2) CSR을 이용한 imaging radar

레이더는 상대적으로 정확하지 않은 고도와 도플러 이동 정보를 담고 있다. 많은 레이더는 고정된 주파수를 사용하여 고도-시가-세기 맵으로 정보를

보여주는데 관측결과를 해석하려면 관측된 불균질의 세기가 일정하다는 가정하여 하고 빔 크기 보다 작은 크기의 밀도 불균질의 경우는 일반적인 레이더 관측으로 알아내지 못하는 문제가 있다. 레이더의 안테나 간섭계를 이용한 레이더 간섭계 관측은 레이더 빔 크기 안의 밀도 불균질의 지역적인 분포를 보여 줄 수 있다. 하나의 베이스라인을 가지는 두개의 수신기 세트는 분포상의 세개의 모멘트를 만들어 낼 수 있다. 따라서 수신기의 개수를 늘리고 베이스라인의 조합을 다양하게 하여서 좀 더 많은 모멘트를 확보하고 이에 따라 불균질 영역을 이미징 할 수 있다.

[그림2-8]는 여러 개의 베이스라인을 가지고 레이더 이미징을 할 수 있는 안테나 배열을 보여준다. 여러 개의 베이스라인으로 생성된 많은 모멘트를 이용하여, 최종적으로 밀도 불균질 지역의 이미징을 실시한 예를 보여주고 있다. 빨간색의 T 표시는 송신기 위치를 나타낸 것이다. 아래는 위의 안테나 간섭계가 가질 수 있는 서로 다른 베이스 라인을 표시하고 있다.



[그림2-8] 레이더 이미징을 위한 안테나 간섭계의 배열

따라서, 간섭계를 이용한 이미징 레이더 기법은 전리층의 밀도 불균질에 대한 지역적인 분포를 연구하는데 유용한 툴이다. 간섭계의 해상도는 안테나 배열에서 가장 긴 베이스라인에 의해 정해지고, 이러한 베이스라인의 조정을 통해서 고해상도의 레이더 이미징이 가능하다.

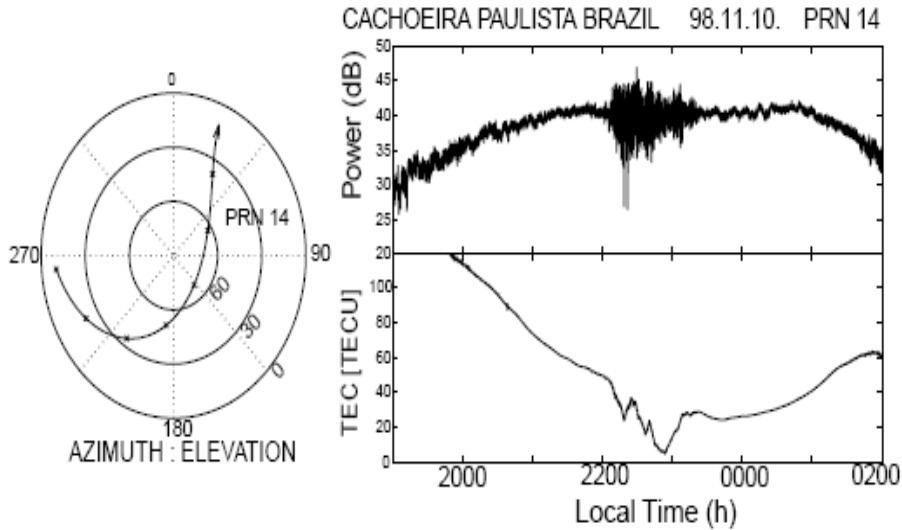
2. 위성(GPS)을 이용한 전리층 관측

GPS는 지구 상공 26,000km 궤도에서 운용되며 지상으로 전파를 발사하고 지상에서는 이 전파를 수신하여 위치정보를 계산한다. GPS는 L 밴드의 두 주파수($L1=1575.42$ MHz, $L2=1227.6$ MHz)를 사용하는데 이 주파수 영역에서의 전파는 전리층을 통과하면서 자유 전자들에 의한 전파 경로의 굴절 때문에 신호 지연 현상이 생긴다. 태양 활동이 비교적 활발하지 않을 때 GPS 측정값 중 전리층에 의한 오차는 수 cm에서 수십 m에 이른다. 그러나 태양 활동이 활발했던 때에는 위치 정밀도에 따른 오차가 약 100m 까지 발생한다.

GPS 신호가 전리층을 통과할 때 전리층에서 지연 정도를 결정하는 가장 중요한 요소는 총전자수(TEC)이며 이는 태양 활동이나 계절, 일변화, 연변화, 수신자의 위치 그리고 시선 방향 등에 따라 변한다. 정밀한 총전자수 값의 추정에는 우주환경 연구나 지구 원격탐사 등의 여러 응용분야에 이용되며 특히 국내외적으로 활발히 연구되고 있는 Wide Area Augmentation System(WAAS)의 정밀도를 향상시키기 위해 필수적이다. 또한 한반도 상공의 전리층 변화에 대한 감시는 전리층에 의한 통신 장애나 전파 지연 예보를 위해 반드시 요구된다.

가. 신틸레이션 관측기

GPS 전파 신호의 신틸레이션 효과는 우주환경 관측에서 비교적 초창기에 발견된 현상이다. GPS위성의 전파 신호가 전리층을 지나면서 신틸레이션을 겪는데 진폭 및 위상에서 신틸레이션 효과가 나타난다. GPS의 전파 신호는 전리층의 밀도 불균질에 매우 취약해서 진폭이 20 dB 이상 감소하기도 하는데 이 때문에 GPS 위성으로부터 송신된 약한 신호가 신틸레이션에 의해 GPS 수신 기능을 저하시키고 GPS 수신기 운영을 어렵게 하고 있다. 신틸레이션에 의하여 간섭된 GPS 전파 신호는 위상의 변화를 겪어서 위상 결정에 어려움을 주고 있다.

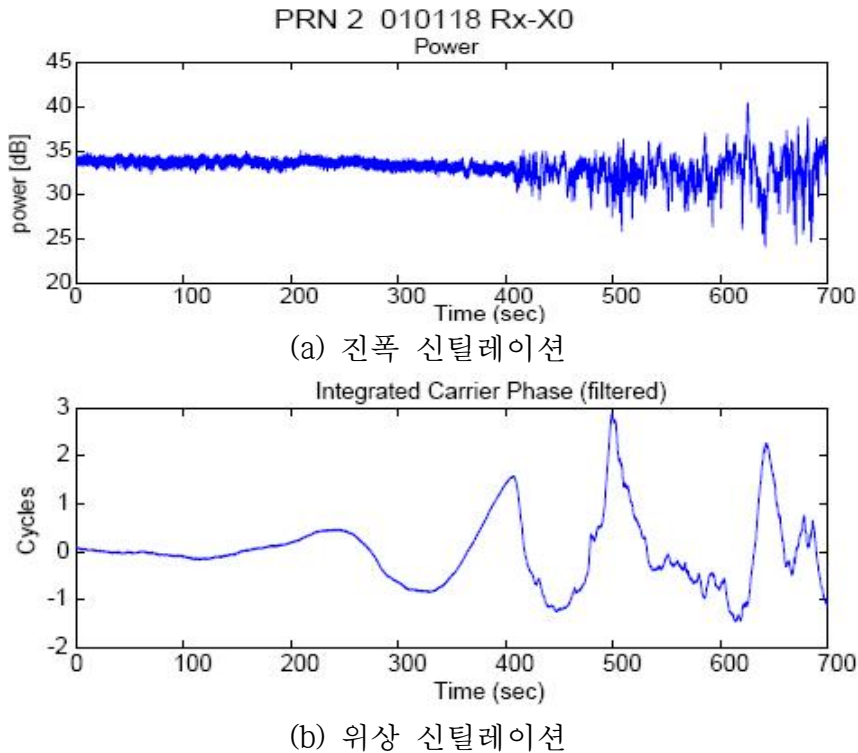


(a) GPS 위성의 방위각과 고도 (b) L1 주파수 진폭변화와 총전자량 변화
[그림2-9] 적도 부근에서 L1 주파수의 진폭 신틸레이션

GPS 신틸레이션은 대체로 지자기 적도를 포함한 저위도 지역에서 주로 일어나며 태양 활동이 심할 때 신틸레이션의 효과는 더욱 강해진다.

신틸레이션의 효과를 실시간으로 감시하기 위하여 GPS 위성의 전파 중 L1 주파수를 이용하여 진폭 신틸레이션과 위상 신틸레이션을 측정하는 기기가 Scintillation Monitor (SCINTIMON)가 있다. [그림2-9]은 적도 지역의 불균질 지역을 지날 때 GPS 위성인 PRN 14의 위치와 같은 시각의 총전자량의 변화와 L1 주파수의 진폭 신틸레이션 현상을 보여준다.

[그림2-9] (a)는 GPS 위성의 방위각과 고도로 위치를 나타낸 것이며 [그림2-9] (b)는 같은 시각 L1 주파수의 진폭 변화와 총 전자량의 변화를 표시한 것이다. 적도의 밀도 불균질 지역을 전파신호가 지날 때 저위도 밀도 불균질의 버블에 의해 총 전자량이 감소됨을 알 수 있다. 이러한 밀도 불균질의 크기 척도는 프레넬 길이로 표시할 수 있는데 프레넬 길이가 약 400 m 정도 되는 크기의 밀도 불균질에 의해 L1 주파수가 약 15dB 정도의 요동이 생김을 알 수 있다. [그림2-10]은 신틸레이션의 또 다른 예를 보여주는데 [그림2-9] (a) 진폭 신틸레이션과 [그림2-9] (b) 위상 신틸레이션이 동시에 일어나고 있음을 알 수 있다.



[그림2-10] 진폭 신틸레이션과 위상 신틸레이션 예제

중위도 전리층에서의 밀도 불균질은 저위도 보다는 빈번하지 않지만 지자기 폭풍과 같은 태양 극대기에 자주 일어나는 현상이고 이러한 현상이 극대화되었을 때는 평상시에 신틸레이션 효과를 보이지 않던 중위도 전리층에서도 신틸레이션을 관측할 수 있다. 최근 들어 지자기 폭풍 시기에 중위도에서의 신틸레이션 현상이 관측됨을 여러 연구자들의 관측에 의하여 알려진 사실이다.

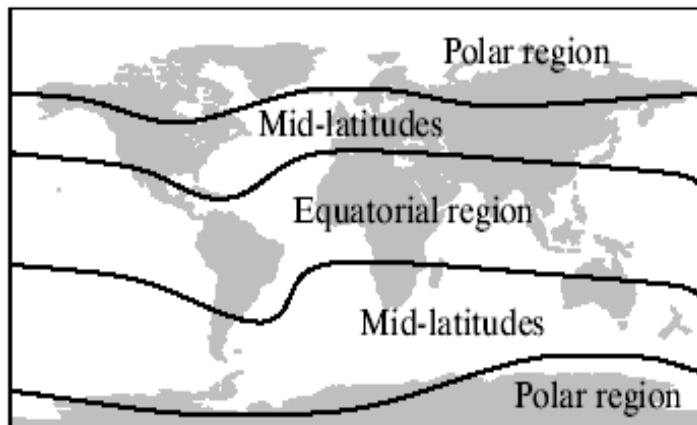
단일 주파수를 이용하여 GPS 수신기를 구성하여 위성의 전파신호가 전리층의 밀도 불균질 지역을 지날 때 신틸레이션이 일어나는 것을 감시할 수 있는데 이런 원리의 신틸레이션 모니터는 중 저위도 지역에서 전리층 연구의 보조수단으로 활용가치가 높다. 그러나, 이중 주파수의 GPS수신기를 이용할 경우 이러한 신틸레이션을 관측이 가능하나 관측의 빈도나 가격 등을 고려할 때 전리권 관측을 위하여 고가의 이중 주파수 GPS 수신기를 설치하는 것은 가격대 효용면에서 권장할 만한 것은 되지 않는다.

나. GPS 수신기

전 지구상에서의 GPS 신호를 이용한 측위는 지자기 폭풍이 발생할 때 지상과 위성 사이 전리층의 총 전자함유량(TEC)이 변화한다. 전리층 플라즈마의 TEC의 급격한 증감은 단일주파수 GPS 수신기의 정확도에 직접적으로 영향을 주며 이중 주파수 GPS 수신기의 경우 이러한 전리층에 의한 영향을 측정하여 보정을 하는 것이 가능하다.

작은 규모에서는 TEC의 불균일성에 의한 산란효과가 일어나며, 그 정도는 위도에 따라 다르다. 예를 들어, 자기장 적도의 남북으로 위도 15~20도 이내의 영역은 지자기폭풍이 일어나지 않을 때에도 전리층의 불균일성이 가장 크다. [그림2-11]는 위도와 공간에 따른 전리층 지역의 세분화를 나타낸다. 겉으로 봐선 예측 불가능한 전리층 상부의 밀도증가현상은 저녁시간에도 발생하여 전파를 잘못된 방향으로 보낼 수도 있다. 이러한 산란현상으로 GPS의 작동은 단일 및 이중 주파수 수신기 모두 영향을 받게 된다.

전리층 영역을 통한 전자기 GPS 신호 전파시 분산이 일어나고 전파신호 전압의 변화가 일어난다. GPS 수신기는 코드 신호의 전파지연은 실제거리보다 측정거리를 더 길게 만든다. 반송파 위상의 경우는 전리층 통과시 앞섬(advance)효과로 인해 자연 상태에서는 마이너스이고 실제거리보다 측정거리를 더 짧게 만든다. 전리층 지연은 GPS 위성의 양각에 따라 서로 다르게 나타나는데 양각이 작을수록 전리층 통과로 인한 오차가 커진다.

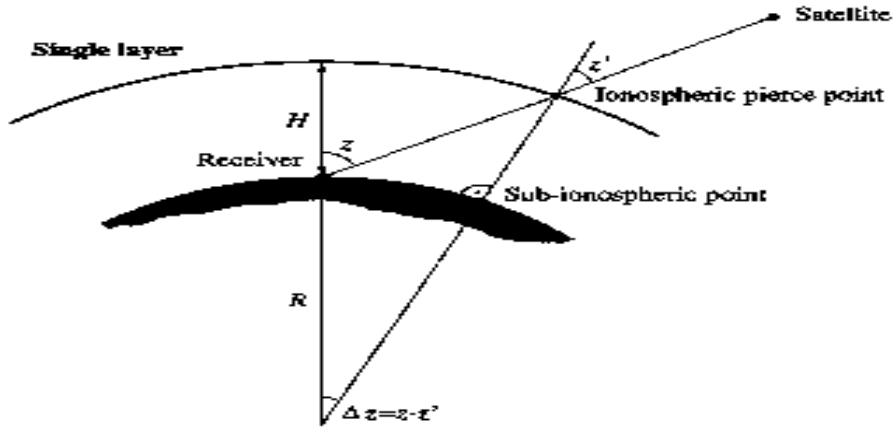


[그림2-11] 위도와 공간에 따른 전리층 지역의 세분화

또한 전리층의 영향을 감소시키기 위해서는 보정공식이 측정된 자료에 적용될 수 있다. 보정의 정확도는 신호경로에 따른 TEC 추정 신뢰도에 좌우된다. TEC은 정확도를 판단하기 어렵기 때문에 보정공식의 적용이 GPS 신호 오차 영향을 효과적으로 제거하지는 못한다. 만약 이중 주파수 수신기를 사용하면 이 영향은 L1과 L2 신호의 특수 선형 조합에 의해 보정될 수 있다. 그러나 만약 단일 주파수 수신기를 사용한다면, 보정계수(8개 계수(α , β))는 위성 메시지로부터 얻을 수 있다. 대표적인 모델이 Klobuchar 모델인데, 이것은 중위도 지역에서의 전리층 지연의 50~60%를 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다.

GPS 위성의 전파 신호의 지연시간은 전리층에 분포한 전자밀도에 따라 민감하게 변화하기 때문에 이렇게 지연된 시간을 역으로 사용하면 고도 26,000km 궤도의 위성에서부터 지상의 수신국까지의 전자들의 기둥밀도인 TEC(Total Electron Contents)를 계산할 수 있다. GPS 신호의 시간 지연을 측정할 수 없는 단순한 수신기의 경우 GPS 위성과 수신기 사이의 TEC가 얼마나 정확하게 주어지는가에 따라 GPS 수신기의 위치 측정 오차가 결정된다.

전리층의 전파신호 교란과 관련하여 TEC은 지상과 위성의 전파 통신에 영향을 주는 전리층의 정보를 주는 중요한 인자이다. 특히 전리층에서 80에서 110 km 사이의 E층과 100 km 이상의 F층의 변화가 TEC 변화에 크게 작용한다. 이러한 전리층의 변화는 전파 교란을 일으키며 이러한 전파교란은 불규칙적이고 지역과 시간에 따라 다르며, 복잡하게 전파신호를 분산시킨다. 이러한 전파교란 양상은 적도지역이나 고위도 지역에서 모두 나타난다. 고위도 지역 즉, 65도에서 75도 사이의 오로라 지역에서는 전파교란의 주된 원인은 주로 100에서 150 km 사이로 유입되는 입자들에 의한 자기폭풍, 서브 스톱 등이 나타난다. 이러한 오로라와 자기폭풍의 발생은 태양 극대기 이후 몇 년 동안 더욱 자주, 강하게 일어난다. 지난 태양활동 극대기는 2000-2001년 동안 있었다. 적도지역에서 플라즈마 불균질은 주로 지방시 21시 이후에 자주 나타난다. 이런 불균질 현상은 태양 극대기와 봄, 가을 계절 동안 최대를 보이고 해가 진 뒤 강한 전파 교란을 야기한다.



[그림2-12] GPS 수신기 원리

[그림2-12]에서와 같이 전파신호는 전리층을 통과할 때 휘어지고 지연된다. 이 경우 굴절 지수 n 은 식 (3) 와 같이 전리층의 전자밀도 N 과 전파 신호의 주파수 ν 의 식으로 표현된다.

$$n = 1 - 40 \frac{N}{\nu^2} \quad (3)$$

GPS 관측에서 전리층 통관 지연시간 보정은 다음 식 (4)의 Total Electronic Content (TEC) 와 연관이 있다.

$$\rho_{iono} = \int n(\rho) d\rho = \pm \frac{C_x}{2} TEC \nu^{-2} \quad (4)$$

여기서 $\frac{C_x}{2} \approx 40.3m^3s^{-2}$ 이고 여기서 TEC는 시선방향 (line-of-sight) 또는 기울어진 방향의 TEC (slant Total Electronic Content) 이고 단위는 10^{16} electrons/ m^3 (TECU unit) 이다. 지상국의 GPS 자료를 이용한 TEC 매핑을 위해 기울어진 방향의 TEC를 수직방향의 TEC로 제공해 줄 매핑 수식이 필요하다. 이때 소위 single-layer model이 사용된다. 전체 자유 전자들이 고도 H 에 무한한 두께의 껍질로 존재한다고 가정하고 이 이상적인 층의 고도는 보통 최대 전자 밀도 고도와 같은 대략 350 또는 400 km 로 고정한다. 수직방향 VTEC 또는 $TEC(0)$ 와 기울어진 방향의 slant $TEC(z)$ 의 관계식은 식 (5) 과 같다.

$$TEC(z) = TEC(0) \times \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}} \quad (5)$$

여기서 $\sin z' = \sin z \times \frac{R}{R+H}$ 이고 z 는 지상의 수신국 위치에서 위성까지의 천정 거리, z' 는 얇은 층의 고정된 위치에서 위성의 천정 거리이다.

기존에 많이 사용하는 전리층 모델에서는 ionospheric pierce point 인 hmF2가 350km나 400km 로 고정되어 사용되고 NmF2의 최대값이 나타나는 지방시를 14시로 고정하여 사용한다. 이미 발표된 논문들을 통해 NmF2와 hmF2는 지역마다 다르며, 태양활동 정도, 지자기 활동 정도, 지방시, 계절에 따라 다르다고 알려져 있다. 기존의 모델에서는 이러한 NmF2와 hmF2의 변화를 고려하지 않은 상태이다.

신호의 지연시간은 전리층에 분포한 전자밀도에 따라 민감하게 변화하기 때문에 이렇게 지연된 시간을 역으로 사용하면 고도 26,000km 궤도의 위성에서부터 지상의 수신국까지의 전자들의 기둥밀도인 TEC(Total Electron Contents)를 계산할 수 있다. GPS 신호의 시간 지연을 측정할 수 없는 단순한 수신기의 경우, GPS 위성과 수신기 사이의 TEC가 얼마나 정확하게 주어지는가에 따라 GPS 수신기의 위치 측정 오차가 결정된다. 현재 미국 NASA(National Aeronomy and Space Agent)의 JPL(Jet Pulse Laboratory)는 매 2시간마다 웹을 통해 전 지구 TEC 지도를 제공하고 있다. 이 지도 작성에서 [그림2-12]에서처럼 기울어진 방향의 TEC (slanted TEC)를 각 지역에 수직한 방향의 TEC으로 변환하는 과정이 필요한데, 이 때 전리층 모델이 필요하다.

3. 이론 모델에 의한 전리층 예측

가. Klobuchar 모델

Klobuchar모델은 천정 방향 전리층 오차가 낮 동안에는 반 코사인 함수의 형태를 보이며 밤 시간에는 시간에 대한 변화가 없음을 가정하여 예측하는 모델이다. 이 모델은 지자기장 활동의 영향이 적은 중위도 지역 전리층에 적합하며 갑작스런 지자기 폭풍에는 보정이 어려운 단점을 갖는다. GPS 신호의 전리층 오차는 Klobuchar 모델에 의해 약 50 % 정도 제거된다.

나. Global Ionospheric Maps (GIMs) 모델

Global Ionospheric Maps(GIMs) 모델은 전 세계 IGS 네트워크를 이용한 전 지구적 전리층 모델이다. 이 모델은 IONEX 포맷을 기반으로 특정 시간대의 TEC 값을 지구 고정 좌표 상에서 $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 격자 간격으로 저장한다. 여러 IGS 전리층 분석 센터에서는 GIMs 모델을 개발을 위한 TEC 값을 결정하여 위도와 경도에 대한 이차원 전리층 전자밀도 맵을 제공한다. 우리나라와 같은 좁은 지역에서는 GIMs 모델의 비교적 큰 격자 해상도로 인해 정밀한 TEC 값을 기대할 수 없다. 전리층의 국부적 현상을 모니터링하고 분석하기 위해서는 지역 GPS 네트워크를 이용한 지역적 전리층 모델이 요구된다.

다. IRI (International Reference Ionosphere) 모델

IRI(International Reference Ionosphere) 모델은 COSPAR (Committee on Space Research)와 URSI (International Union of Radio Science)에 의해 공인된 경험적 전리층 모델이다. IRI은 COSPAR와 URSI의 그룹에 의해 계속 개정되며 현재 IRI-2012 모델까지 개발되었으며 미국의 Lowell의 Center for Atmospheric Research (UMLCAR)는 주로 유닉스에서 포트란 컴파일에 의해 주로 실행되던 IRI 모델을 마이크로소프트 윈도우 버전으로 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 자바 스크립트로 개발하여 제공한다.

IRI 모델은 특정 위치, 시간, 날짜에 따라 월 평균된 전리층 환경과 관련된 값들을 50 km에서 2,000 km까지의 고도 범위로 제공하며 기반 관측자료는 전 세계적으로 분포된 Ionosonde 관측기 네트워크를 이용하고 있다. 또한 IRI 모델은 매년 열리는 정기 워크숍을 통해 개정판을 제공하며 이를 통해 IRI 모델의 지속적으로 정확도를 높여가고 있으며 최근 2012년에는 Ionosonde 관측자료를 동화한 실시간 IRI-2012 모델이 발표되었다.

[표 2-1] IRI 모델의 입력 요소와 산출 결과 요소

입력값	출력값
<ul style="list-style-type: none"> • 년도 (1958-2013) • 월 및 일 • 시간 • 위도와 경도 • 고도 (60km부터 2000km) 〈부가적 입력 요소〉 • 태양 흑점 수 (0~400) • 전리층 인자 (-50~400) • 총전자량 고도 경계면 (50km~2000km) • 상층대기, F층, foF2 모델 선택 • 하층 두께, F1발생빈도, D층 전자 밀도 선택 • 상층 대기 전자 온도와 이온 구성비 모델 선택 • F2 최대 밀도 및 고도 선택 	<ul style="list-style-type: none"> • 전자 밀도 (N_e, m^{-3}) • 전자밀도와 F2 최대밀도의 비 ($N_e/NmF2$) • 중성 대기 온도 (T_n, K) • 이온 온도 (T_i, K) • 전자 온도 (T_e, K) • 총전자량 (TEC, $10^{16}m^{-2}$) • 상층 총전자량 퍼센트 • F2 최대값 고도 (hmF2, km) • F1 최대값 고도 (hmF1, km) • E 최대값 고도 (hmE, km) • D 최대값 고도 (hmD, km) • F2 최대값 밀도 (NmF2, m^{-3}) • F1 최대값 밀도 (NmF1, m^{-3}) • E 최대값 밀도 (NmE, m^{-3}) • D 최대값 밀도 (NmD, m^{-3}) • 적도 지역 이온의 고도별 흐름 (m/s) • 확산 F (Spread F) 확률 • 지자기 스톱 foF2와 일상 foF2의 비 • 산소 이온의 구성비 (%) • 수소 이온의 구성비 (%) • 헬륨 이온의 구성비 (%) • 산소 분자 이온의 구성비 (%) • 산화질소 분자 이온의 구성비 (%) • 나머지 이온의 구성비 (%) • 질소 이온의 구성비 (%) • F2 플라즈마 진동수 (foF2, MHz) • F1 플라즈마 진동수 (foF1, MHz) • E 플라즈마 진동수 (foE, MHz) • D 플라즈마 진동수 (foD, MHz)

제3장 국내 GPS 관측데이터 연계 및 서비스 제공

제1절 배경

우주전파센터에서는 이천과 제주에 GPS 관측소 운용 중에 있다. 그러나 GPS 신호분석을 통한 우리나라 전역에 대한 전리층 분석을 위해서는 GPS 관측소가 현저히 부족한 상황이다. 현재 국내에서 GPS 관측소를 운용하는 기관은 한국천문연구원, 국토정보지리원, 위성항법중앙사무소 등이 있다. 그러나 각 기관들은 독자적으로 운용하면서 기관 특성에 따라 수집 데이터를 가공하여 사용하고 있다. 따라서 본 연구를 통해 각 기관에서 운용중인 관측자료를 통합하기 위해 3개 기관과 네트워크 연동망을 구축 할 필요가 있다. 이러한 연동망을 통해 전국에 분포된 GPS 관측소 데이터를 수집하고 이를 가공하여 우리나라 전역에 대한 전리층 분석정보를 보다 정확하게 도출할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구를 통해 상호 연동망을 구성을 위한 3개 기관과 협력체계를 구축하고 자료 호환을 위한 방안을 마련하였다. 따라서 한국천문연구원은 9기, 국토정보지리원 52중 실시간 제공이 가능한 45기, 위성항법중앙사무소 26기중 실시간 제공이 가능한 12기 관측소를 연계망을 구축하여 우주전파센터에 실시간으로 자료를 제공 받을 수 있도록 하였다. 또한 수집된 데이터를 통해 우리나라 전역에 대한 전리층 총전자량 및 연간 변화량 등을 우주전파센터 홈페이지를 통해 제공하였다.

제2절 국내외 GPS 정보제공 서비스 동향

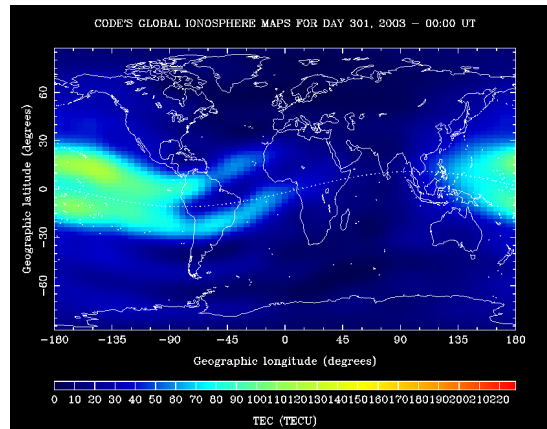
1. 국외 GPS 정보제공 서비스

미국의 JPL, 스위스 베른 대학의 CODE, ESA의 ESOC, 그리고 호주의 IPS에서는 약 300여개의 GPS/GLONASS 사이트 중 사용 가능한 관측 자료(50-100개 관측소)를 이용하여 GPS 총전자량 맵을 제공하고 있다. 대부분의 시간 해상도는 2시간이다. 가장 안정적으로 맵이 제공되는 곳은 미국의 JPL, 스위스 CODE, 호주의 IPS이며 나머지 기관 자료는 총전자량 맵이 상시적으로 제공되고 있지는 않는 상황이다. 이는 각 기관이 이용하고 있는 GPS 관측소의 운영 상태에 의존하는 것으로 판단된다.

가. 유럽

1) CODE(European Centre for Orbit Determination)

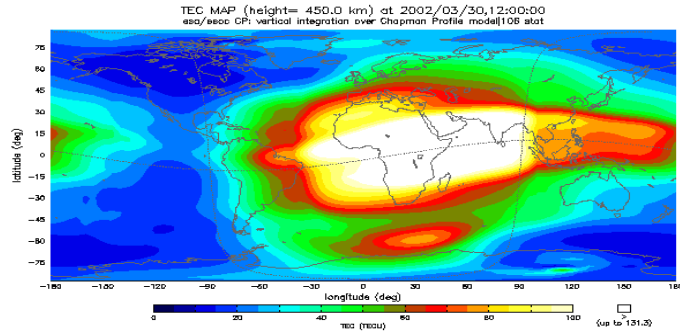
유럽은 스위스 베른대학의 CODE에서 IGS 분석센터를 운영하여 GPS 총전자량 및 DCB 정보 산출 관련 연구를 수행한다. CODE에서는 IGS 관측소의 관측값을 이용하여 구면 조화 함수를 적용한 GPS 총전자량 전지구 맵을 공간해상도 $2.5 \times 5.0^\circ$ 그리고 시간 해상도는 2시간으로 상시 제공하고 있다. [그림3-1]은 CODE에서 산출한 총전자량 전지구 맵 모델 결과이며 정보제공 사이트는 <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>이다. 이와 같은 넓은 시공간 해상도는 전 지구 전리층 변화를 감시할 수 있으나 우리나라 같이 작은 지역에 대해서는 적당하지 않다.



[그림3-1] CODE의 총전자량 전지구 맵 모델 결과

2) ESOC(European Space Operations Centre)

ESOC는 ESA의 지상 관측소 및 위성의 운용과 데이터 관리 등의 임무들을 관리하는 주 센터로써 독일에 위치한 기관이다. ESOC는 2003년 이후로 실시간 GPS 상시 관측망을 구축하였으며, 2006년 이후 IGS 실시간 관측 위킹그룹에 참여하고 있다. ESOC는 GPS 총전자량 전지구 맵은 공식 웹을 통하지 않고 CDAWeb을 통하여 제공되며 CODE와 같은 $2.5 \times 5.0^\circ$ 의 위·경도 공간 분해능과 2시간의 시분해능으로 [그림3-2]과 같은 결과로 나타내며 ESOC의 공식 사이트는 http://www.esa.int/About_Us/ESOC 이다.

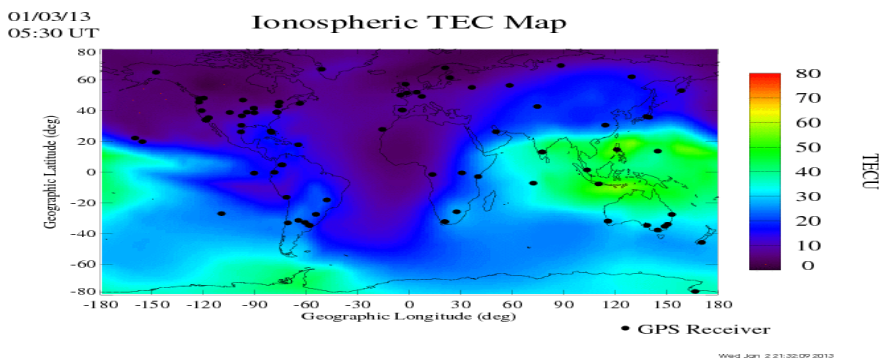


[그림3-2] ESA/ESOC의 총전자량 전지구 맵 모델 결과

나. 미국

1) JPL (Jet Population Laboratory)

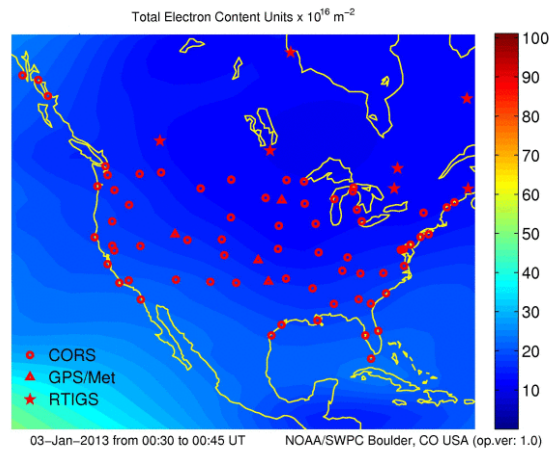
미국 JPL에서는 웹사이트 <http://iono.jpl.nasa.gov/> 를 통하여 [그림3-3]과 같이 실시간 총전자량 맵을 5분 시 분해능으로 제공하고 있다[그림3-3]. 공간 분해능은 $2.5 \times 5.0^\circ$ 으로 CODE, ESOC와 같다. 그러나 같은 공간 분해능을 갖고 있지만 CODE, ESOC 그리고 JPL에서 산출하는 전지구적 총전자량 맵들은 분포 차이를 보인다. 이는 [그림3-3]의 오른쪽 부분에서처럼 IGS GPS 관측소 분포가 균일하지 못하며 해양 쪽에는 관측소의 수가 부족하므로 맵을 그릴 때 mapping 함수를 사용하여야 한다. 그런데 JPL과 CODE는 mapping 함수로 Klobuchar 함수를 사용하며 ESOC에서는 Chapman 분포를 사용한다. 그리고 경사 총전자량에서 수직 총전자량으로 변환 시에도 mapping 함수가 적용되는데 ESOC와 JPL에서는 slap model mapping 함수를 CODE에서는 modified single-layer model(MSLM) mapping 함수를 사용하여 세 기관의 두 가지 mapping 함수들의 적용이 다른 조합을 갖고 있기 때문에 그 결과에서 차이가 나타나는 것이다.



[그림3-3] JPL의 총전자량 전지구 맵 모델 결과

2) NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)

미국 NOAA에서는 SWPC(Space Weather Prediction Center), NGS(National Geodetic Survey), NGDC(National Geophysical Data Center)와 GSD(Global Systems Division)의 공동 작업으로 약 80여개의 GPS 관측소의 결과를 이용하여 미국 주변의 총전자량(US-TEC)을 산출하고 있다. 결과 값은 SWPC를 통하여 최근 미국 지역의 총전자량 맵과 총전자량 불확정성, 최근 10일 평균의 경향성 맵 그리고 수직, 경사 총전자량 값을 제공하고 있다. 그림3-4는 NOAA에서 제공하는 총전자량 맵이며 제공 사이트는 <http://www.swpc.noaa.gov/ustec> 이다. 총전자량 맵의 공간 분해능은 $1 \times 1^\circ$ 의 위·경도 격자크기를 갖으며 시분해능은 15분이다. 총전자량 맵 산출에 쓰이는 DCB 값은 CODE의 자료를 사용하고 있다. 미국 NOAA에서는 지역적 총전자량 맵은 $1 \times 1^\circ$ 의 공간 분해능으로 산출되고 있으며 시분해능은 15분으로 우리나라 결과보다는 낮다.

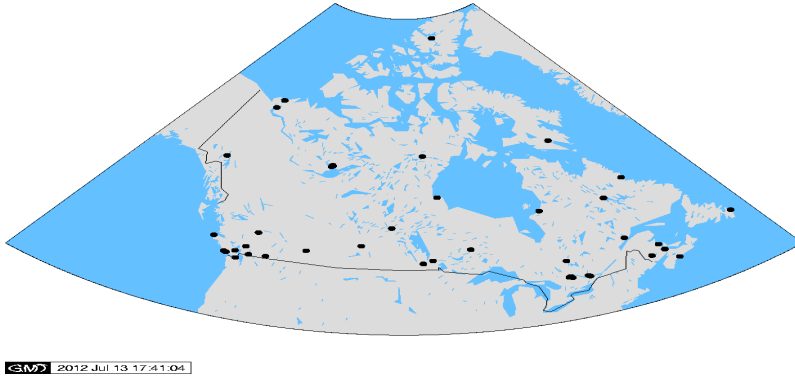


[그림3-4] 미국 NOAA/SWPC에서 제공하는 총전자량 맵 모델 결과

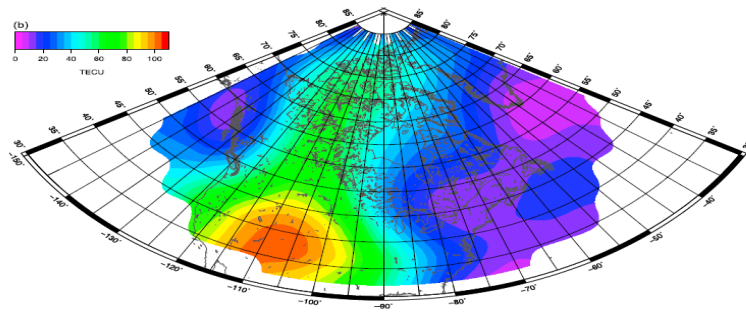
다. 캐나다

캐나다 NRCan(Natural Resources Canada)의 AC(Analysis Center)는 IAG 서비스 초창기부터 국제 GNSS 서비스에 GPS 총전자량을 제공하여 왔다. 캐나다 내의 IGS GPS 관측소는 [그림3-5]과 같이 약 40여개가 분포하고 있다. 공간 분해능은 $3 \times 3^\circ$ 위·경도 격자크기로 약 75개의 관측소를 사용한 일일 총전자량 맵과 약 22개의 관측소의 결과로 얻는 15분 총전자량 맵으로 나뉘어서 만들어지고 있다. [그림3-6]은 일일 총전자량 맵 결과며 제공

하는 사이트는 http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php 이다.



[그림3-5] IGS 망에 제공하는 NRCan GPS 관측소



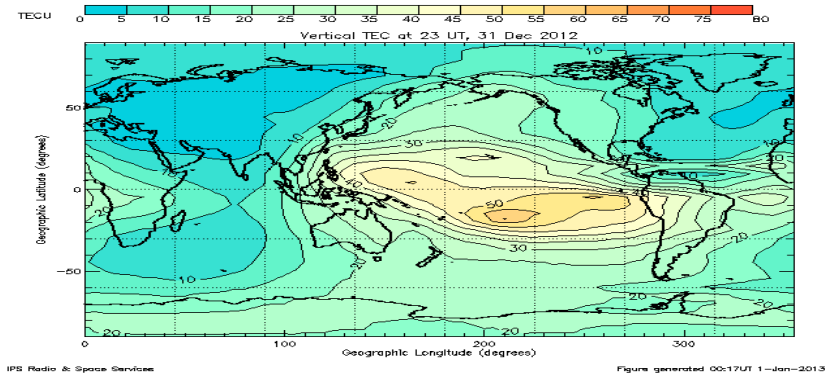
[그림3-6] NRCan의 총전자량 맵 모델 결과

라. 호주

호주 IPS는 <http://www.ips.gov.au> 을 통하여 우주기상 정보 제공 관련 업무를 하고 있다. 이 사이트에서는 호주 지역을 관측하는 자력계, 전지구적인 이온존데 관측 결과, GPS 총전자량 및 전리층 섭동 등에 대한 관측 및 산출 결과물을 제공하고 있다.

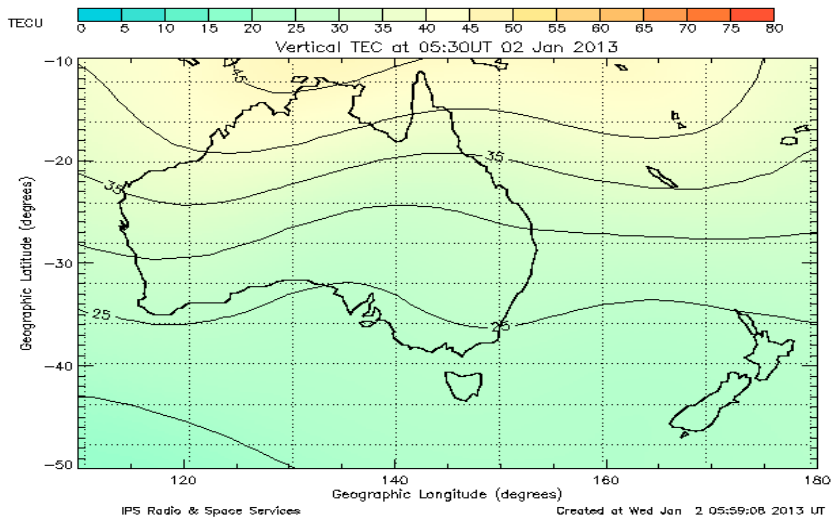
IPS에서는 공식 사이트를 통해 호주 지역의 수직 총전자량을 15분 간격으로 제공하고 있다. 또한 1시간의 시분해능의 전지구적 총전자량 맵을 나타내고 있다. 30일 간의 총전자량 평균에 대한 최근 1시간 총전자량 값의 차이 그리고 L1 에러 및 관측값을 IRI와 Klobuchar 모델과의 비교한 결과를 1시간 간격으로 제공하고 있다. 1시간의 시분해능을 갖는 전지구적 GPS 총전자량 맵은 IRI-2007 전리층 모델에서 도출된 foF2 값을 사용하였다

[그림3-7]은 호주 IPS의 1시간 전지구 GPS 총전자량 맵 모델 결과값을 나타낸다.



[그림3-7] 호주 IPS의 1시간 평균 전지구 GPS 총전자량 맵 모델 결과

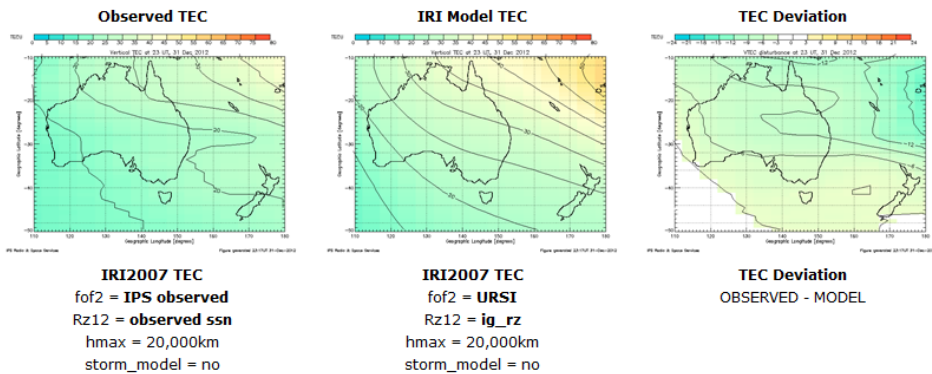
[그림3-8]은 호주 지역의 지역적 GPS 총전자량 맵 모델 결과이다. 이 결과는 실시간 GPS 자료와 IPS에서 관측하는 이온층의 foF2 값을 IRI-2007 전리층 모델과 함께 비교하여 산출된 것으로 해당 웹사이트에서는 3일전 자료까지 확인할 수 있다.



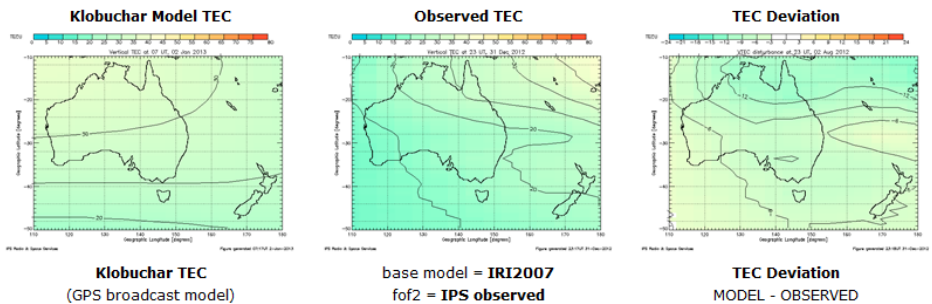
[그림3-8] 호주 IPS에 제공하는GPS TEC 맵의 예시

[그림3-9] (a)는 GPS 관측으로 도출된 호주 주변의 총전자량 맵과

IRI-2007 전리층 모델 결과를 비교한 그림들이다. 두 결과의 차는 상단 가장 오른쪽의 맵으로 여기에서는 호주의 동북쪽 결과가 가장 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. [그림3-9] (b)는 Klobuchar 모델과의 비교 결과이다. Klobuchar 모델은 GPS 단일 주파수를 이용하는 사용자에게 전리층 지연의 보정 모델로 사용되고 있으며 이들의 차이에 대한 연구는 결과적으로 위치 및 항법 오차의 개선에 도움을 줄 수 있다. 이 비교 결과에서도 호주의 동북쪽에서 가장 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 저위도에 가까운 지리적 효과도 있겠으나 호주 동북부 및 해양 근처의 GPS 관측소 부족도 한 요인이 될 수 있어 자료 분석에서 두 요소가 같이 고려되어야 한다.



(a) IRI-2007 모델 비교



(b) Klobuchar 모델 비교

[그림3-9] 호주의 지역적 총전자량 맵과 모델 결과의 비교

2. 국내

현재 국내에서 전리층을 관측을 위한 GPS 관측소를 운용하는 기관은 국토해양부 위성항법사무소, 한국천문연구원, 한국지질연구원 등이 있다.

각 기관에서는 동일한 데이터를 관측하지만 각 기관의 특성에 맞게 서비스를 다르게 제공하고 있다.

가. 한국천문연구원

한국천문연구원은 9개 GPS 관측소를 운용중이며 대전, 수원, 오산 GNSS 관측소는 International GNSS Service(IGS)에 Global Data Center (IGS GDC)로 운영되고 있다. IGS GDC는 아시아-오세아니아 지역 GNSS 관측망의 허브역할과 전 세계 IGS GNSS 자료 및 분석정보를 일반 사용자에게 배포하는 역할을 담당하고 있다. 또한 2011년에는 몽골과 말레이시아 등 해외 GNSS 관측소를 구축하여 운용하고 있다.



[그림3-10] 한국천문연구원 GPS 관측소 현황

나. 국토지리정보원

국토지리정보원은 1995년부터 수원에 GPS 상시관측소를 설치한 것을 시작으로 현재 총 52개 관측소를 운용하고 있으며 실시간 데이터 전송이 가능한 관측소는 45기이다. 1997년 수원 상시관측소가 IGS 관측소에 선정되면서 공식적으로 IGS 활동을 하고 있다.

국토지리정보원은 기존의 측량기술을 바탕으로 주로 GPS를 정밀 지도제작 및 국가 측지좌표계 활용하고 있으며 국가기간산업의 근간인 측량의 기준점, 지도제작, 항공, 항해, 자동차 항법, 지각변동 연구, 위치정보, 학술연구 등을 위한 자료를 제공하고 있다.



[그림3-11] 국토지리정보원 GPS 관측소 현황

다. 위성항법중앙사무소

위성항법중앙사무소는 26개 관측소를 운용중에 있으며 실시간 데이터 전송이 가능한 관측소는 12기이다. 위성항법중앙사무소는 관측소에서 수집된 자료를 통해 연안해역에서 항해하는 선박의 안전을 목적으로 1999년 5월 서해권 서비스를 시작으로 2001년부터 동, 남해권에 위성항법보정시스템 (DGPS) 서비스를 제공하고 있다.

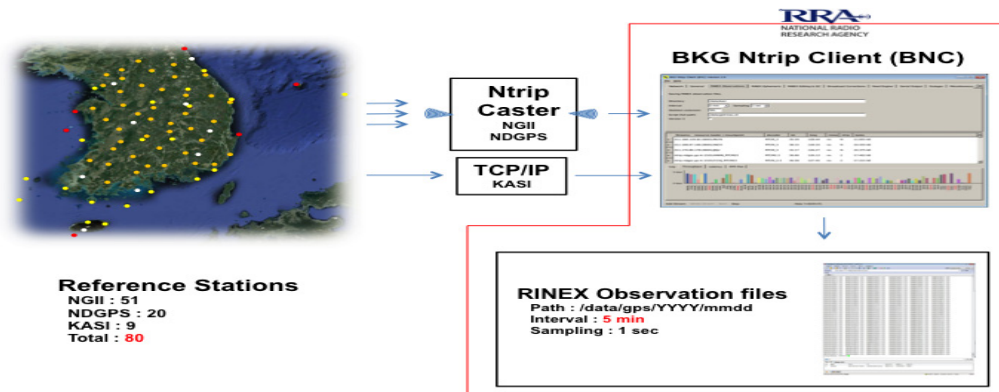


[그림3-12] 위성항법중앙사무소 GPS 관측소 현황

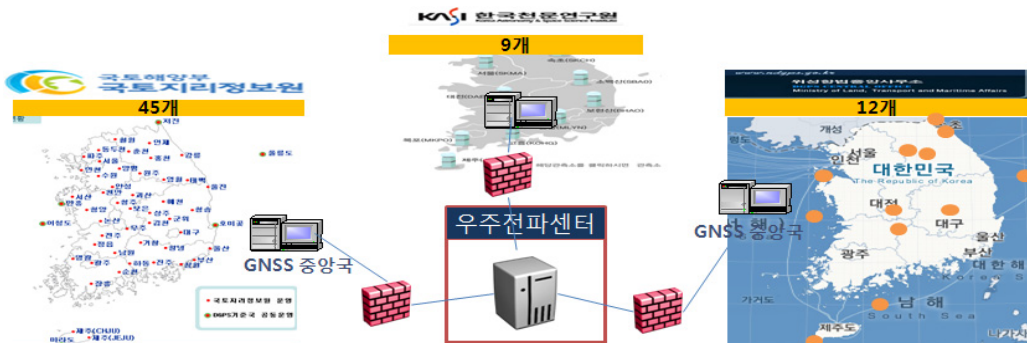
제3절 국내 GPS 관측자료 연계

본 연구를 통해 국내 독자적으로 운영하는 GPS 관측소를 연계하여 전파연구원 우주전파센터에서 통합 수집하였다. 이를 위해 한국천문연구원 9개소, 국토지리정보원 52개소 중 실시간 정보제공이 가능한 45개소, 위성항법중앙사무소 26개소 중 실시간 정보제공이 가능한 12개소를 네트워크로 연결하고 관련 자료를 우주전파센터에서 통합하였다.

수집된 관측자료 파일은 5분 동안 관측된 것으로 이를 스트리밍으로 우주전파센터로 실시간으로 전송하도록 하였다. GPS 관측자료를 RTCM 형식으로 변환하고 자료전송방식은 NTRIP, RTCM은 GNSS 국제표준파일 형식인 RINEX로 자동 변환되어 저장되도록 하였다. 또한 향후 GPS 상시관측소가 추가 확장될 경우에도 통합수집이 가능하도록 확장성을 고려하여 구성하였다.



(a) GPS 관측자료 파일변환



(b) 국내 각기관 GPS 관측소 연계

[그림3-13] 국가기관 GPS 관측소 연계망 구축

제4절 홈페이지를 통한 서비스 제공

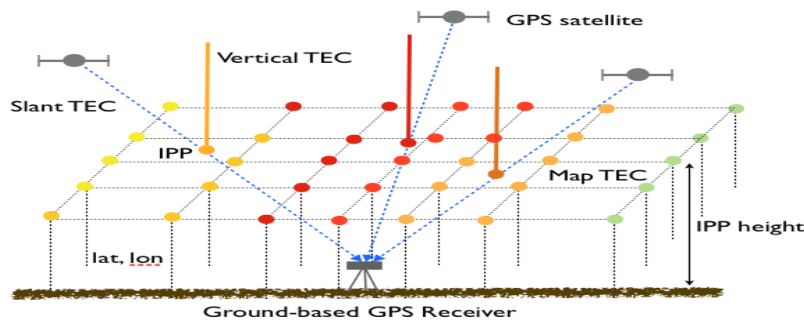
우주전파센터는 본 연구를 통해 한국천문연구원, 국토지리정보원, 위성항법중양사무소에서 운영하는 GPS 관측소의 자료를 통합하여 국내 전리층 정보를 보다 정밀하게 구현하고 서비스를 제공하였다. 이러한 자료통합을 통해 2차원 GPS TEC맵, 연간 TEC 변화추이, TEC Disturance(ROTI) 정보를 서비스하고 있다.

1. 2차원 GPS 총전자량 산출 맵 서비스

한국천문연구원, 국토지리정보원, 위성항법중양사무소에서 운영중에 있는 66개 GPS를 이용하여 우리나라 상공 전리층 총전자수를 산출하고 이를 실시간 2차원 총전자량 맵으로 구현하였다. 2차원 총전자량 맵은 [그림3-14]의 기하학적 모델에 기반으로 공간적 범위는 위도 $33^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 와 경도 $124^{\circ} \sim 131^{\circ}$ 에 시간 해상도는 5분이다. L1/L2 코드와 반송파를 동시에 사용하며 L1/L2 코드의 의사거리는 많은 잡음을 포함하고 있기 때문에 가중 평활화 기법을 적용하여 보완하는 기법이 사용되었다.

GPS 총전자량 산출에 있어서 GPS 전파신호의 전리층 통과 지점(Ionospheric Pierce Point, IPP)의 정확한 측정이 필요하다. IPP는 전자밀도가 최대인 지점을 수신기와 GPS위성 사이의 신호가 투과하는 한점을 의미한다. 전리층 내 전자가 밀집된 지점을 가상의 얇은 층으로 가정하므로 IPP의 고도에 따라서 IPP가 바뀌기 때문이다. IGS 전리층 분석센터는 300km부터 450km까지 다양한 IPP 고도를 가정하여 총전자량을 산출하였다.

본 연구에서는 우주전파센터에서 운용중인 이온존데 전리층 관측기 자료를 분석하여 도출된 hmF2 값을 우리나라 상공 IPP 고도를 결정하여 적용하였으며 IPP 결정에 중요한 요소인 GPS 위성의 궤도결정은 방송궤도력을 사용하였다. IPP의 개수가 2차원 맵의 공간 해상도를 결정하는 중요한 요소이다.

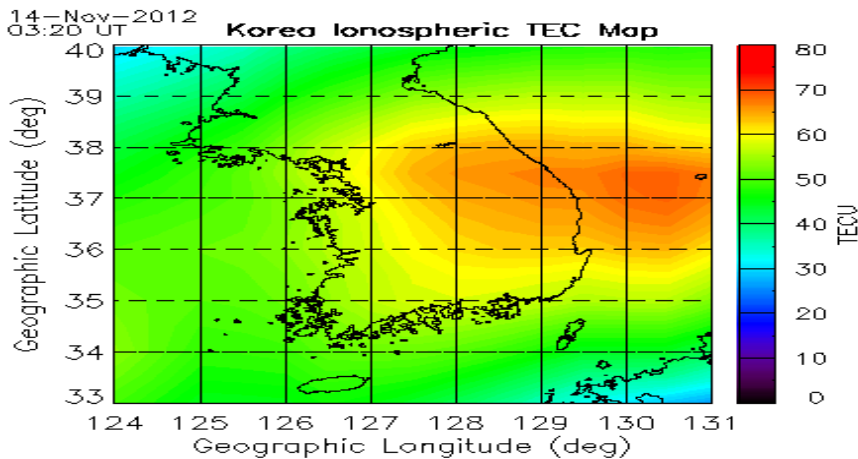


[그림3-14] GPS 총전자량 2차원 산출 모델 개념도

IPP의 개수를 높이면 맵의 공간해상도는 조밀하게 되지만 시간해상도가 저하되어 지자기 폭풍시 발생할 수 있는 짧은 시간의 전리층 변화를 감지하지 못할 수 있다. 따라서 공간 해상도와 시간 해상도와의 적절한 조합이 필요하다. 이외에도 IPP 고도각을 높이면 시선 방향 총전자량에서 수직 방향 총전자량 변환시의 사상함수 오차를 낮출 수 있지만 맵의 공간적 범위 및 해상도에 영향을 미치므로 이 또한 적절한 조정이 필요하다. 우리는 시간 해상도를 5분 그리고 IPP 고도각을 20도로 설정하였다. [그림3-14]는 GPS 총전자량을 2차원으로 산출하기 위한 모델 개념도이다.

우리나라는 전지구적 범위에서 볼 때 매우 작은 지역으로 간주된다. CODE와 JPL에서 제공하는 전지구 GPS 총전자량 맵의 해상도는 위경도로 $2.5^{\circ} \times 5.0^{\circ}$ 로서 우리나라는 거의 1개의 화소에 해당한다. 이에 따라 이보다 작은 전리층 전자밀도 변화를 전지구 GPS 총전자량 맵에서는 볼 수가 없다.

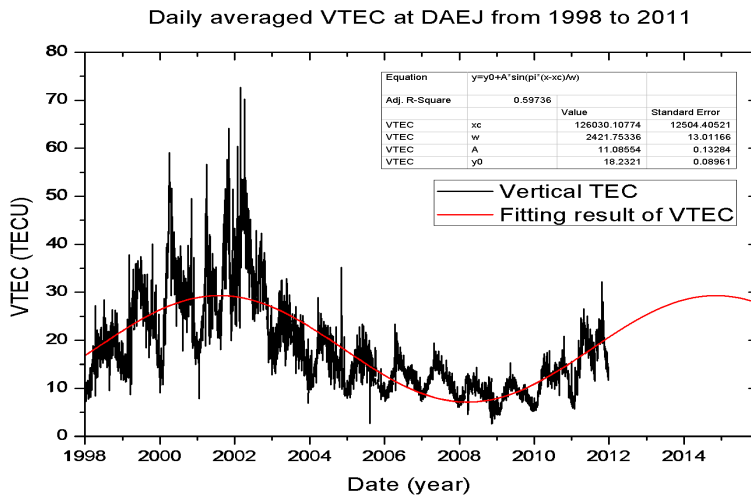
그러나 전파장애 예보를 위해서는 한반도 보다 넓은 지역의 전리층 전자밀도 상태를 감시할 필요성이 있다. 특히, 우리나라는 지리적으로는 중위도에 위치하고 있지만 지자기 위도로는 중위도보다 낮은 저위도에 가까운 곳에 위치하여 적도지역의 영향을 많이 받을 수 있다. [그림3-15]은 본 과제를 통해 우리나라 상공의 실시간 GPS 총전자량 산출맵을 나타낸다.



[그림3-15] 우리나라 상공 실시간 GPS 총전자량 맵

2. 연간 GPS 총전자량 변화 추이 분석 그래프 서비스

우리나라 고유 전리층 예측모델 개발을 위해서는 장기간 전리층 자료의 분석이 필요하다. [그림3-16]에서 제시된 것처럼 과거 우리나라 GPS 총전자량 값이 평균 최대 70 TECU 까지 관측되었음을 알 수 있다. 이는 일 평균 된 값으로서 만약 태양폭풍이 발생할 경우 이 보다 2~3배 이상의 값이 관측될 것으로 예상되며 이는 위성항법시스템이나 전파통신에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.



[그림3-16] 연간 GPS 총전자량 변화 추이 분석 그래프

3. GPS 총전자량 Disturbance 맵 서비스

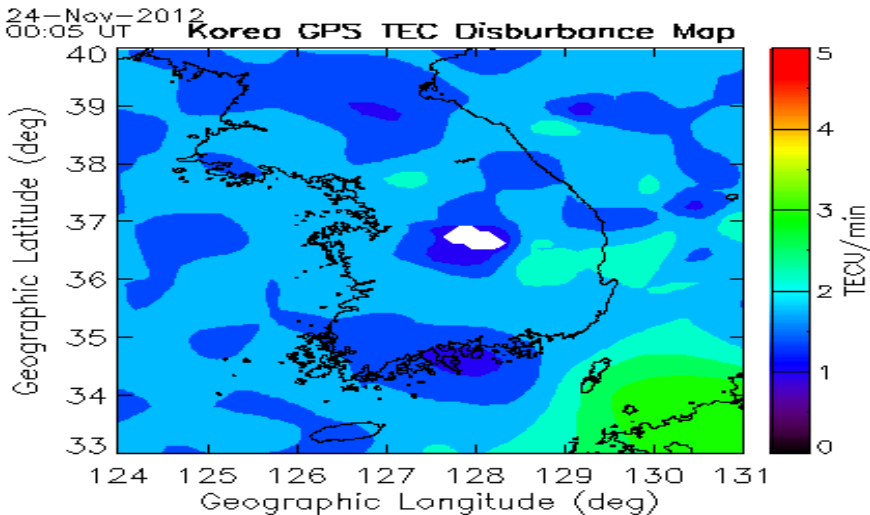
GPS 총전자량 Disturbance(ROTI)란 총전자수의 변화를 지수화 시킨 값으로 총전자수에 대해 5분 동안의 시간적 변화로서 아래 식으로부터 산출된다.

$$ROTI^2 = \frac{\langle \Delta TEC^2 \rangle - \langle \Delta TEC \rangle^2}{\Delta t^2} \quad (6)$$

$\langle \Delta TEC^2 \rangle - \langle \Delta TEC \rangle^2$ 는 연속적인 총전자량의 변화량이며 Δt 는 샘플 시간비의 나타낸다. 각 자료간의 샘플 시간격은 30초이다. 여기에서 사용되는 총전자량값은 경사 총전자량(slant TEC)을 사용한다. 이 ROTI 값은

시간에 따른 총전자량 변화와 비슷하게 나타나지만 좀 더 민감하게 반응하여 전리층 섭동을 감지하는데 유용하게 이용될 수 있다.

본 연구에서는 전리층 총전자량과 ROTI를 이용하여 한반도 내의 지역별, 시간별 전리층 섭동을 감지하고자 이들에 대한 2차원 맵을 [그림3-17]과 같이 구현하였다. [그림3-17]은 한반도 GPS 66개 관측소의 자료를 이용한 결과로 시간격은 5분이다. TEC Disturbance Map에서는 한반도 남동쪽에서 약 3 TECU/min으로 다른 지역에 비해 강한 전리층 섭동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이 맵들로 한반도 전리층 총전자량의 변화와 전리층 교란에 대한 감시를 5분 간격으로 가능하다.



[그림3-17] GPS 총전자량 Disturbance 맵

제4장 단파통신 최적주파수 실시간 제공 방안

제1절 배경

전리권 및 열권을 포함하는 상층 대기의 관측 및 연구는 단파통신에 이용하는 공중파(sky wave)의 전파 특성, GPS 신호의 신틸레이션 현상 등을 이해하는 중요한 수단으로 자리 잡고 있으며, 또한 상층 대기 영역은 저궤도 위성의 위성 끌림(satellite drag) 등의 현상을 일으키는 위성 운영 공간으로서 미래의 위성 운용 및 계획에 발맞추어 활발한 연구가 진행되고 있다.

최근 들어 전리층의 전자기 동역학적인 현상과 열권과 전리권의 인과관계 등이 상층대기 연구에 있어서 최우선적인 과제로서 자리매김하고 있다. 이러한 연구를 위하여 세계 각국에는 위성 및 지상 관측소를 통한 상층 대기 관측 시스템을 설치 운영하고 있으며, 최근 들어 그 수요가 급증하고 있다. 상층대기 관측 시스템으로 관측된 결과들은 전리권, 열권에 대한 모형에 적용되고 이를 바탕으로 우주 전파 환경 정보에서 핵심적인 기술인 신틸레이션, 전리층 예보 등의 기술로 발전되어가고 있는 상황이다. 그러므로 본 과제에서 국내 전리권 관측정보를 실시간 제공하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

국내 전리층 관측정보를 실시간으로 제공하기 위한 방안 마련을 위해 첫 번째로 국내 전리층 관측현황 및 문제점을 분석하고, 둘째로 전리층 관측범위 확대 방안을 마련하고 셋째로 국제표준 전리층 모델기반의 관측자료 동화모델 개발을 통한 실시간 관측정보 제공 방안을 마련하였다.

제2절 단파통신을 위한 전리층 관측 현황 및 문제점

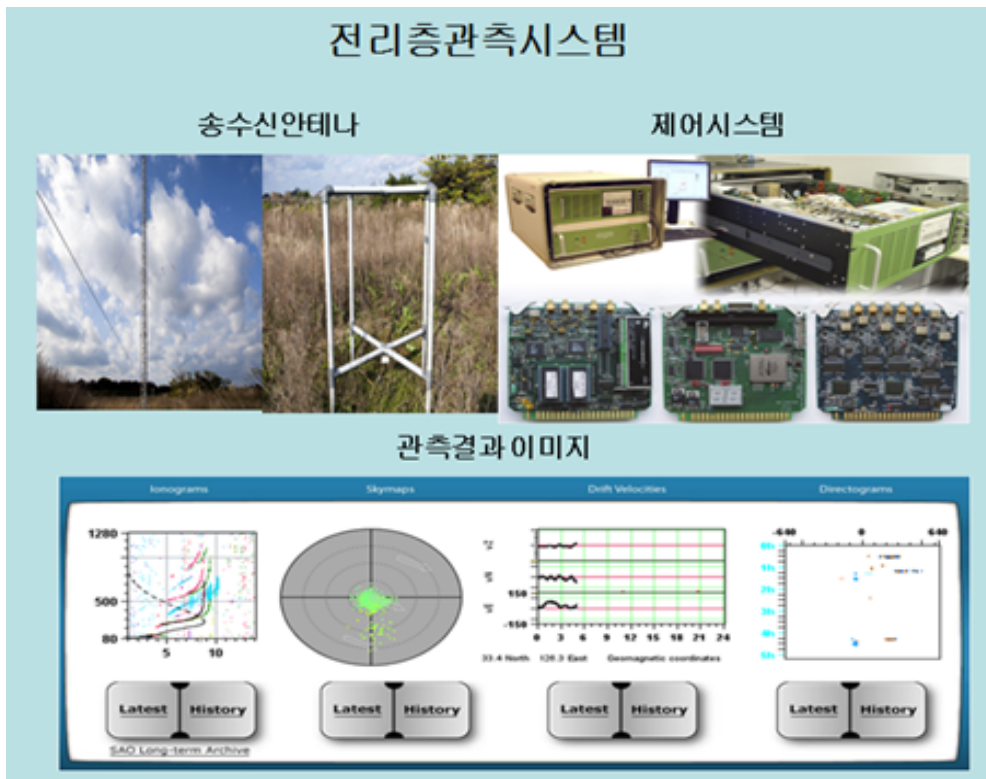
1. 단파통신을 위한 전리층 관측장비 현황 및 문제점

가. 전리층 관측장비 현황

국립전파연구원은 국내 우주전파환경연구 선도 기관으로서 1966년부터

안양에 전리층 관측기를 설치·운영하여 태양폭발이 전리층에 미치는 영향을 분석하고 단파대역 전파예보에 활용하여왔다. 현재는 이천과 제주에 각 1기를 설치하여 운영중이며 URSI에 관측소 코드 AN438로 등록되어있고 2008년 8월부터는 세계데이터센터(WDC : World Data Center)에 관측자료를 실시간 전송 중이다.

우주전파센터가 보유하고 있는 전리층 관측기는 Ionosonde로 미국 메사추세츠 대학 로웰 대기연구센터(UMLCAR : Univ. of Mass. Lowell Center for Atmospheric Research)에서 제작한 DPS-4D 모델이다. Ionosonde 관측은 높이에 따른 전리층 플라즈마 전자밀도의 분포를 측정하기 위한 가장 기본적인 방법으로 전파를 수직 입사하여 전리층 내의 여러 전자층에서 반사되어 오는 전파를 측정함으로써 전리층 내 전자들의 분포를 높이에 따른 함수로 나타내 준다. [그림4-1]은 이천과 제주에 설치된 전리층관측시스템(DPS-4D)을 나타낸다.



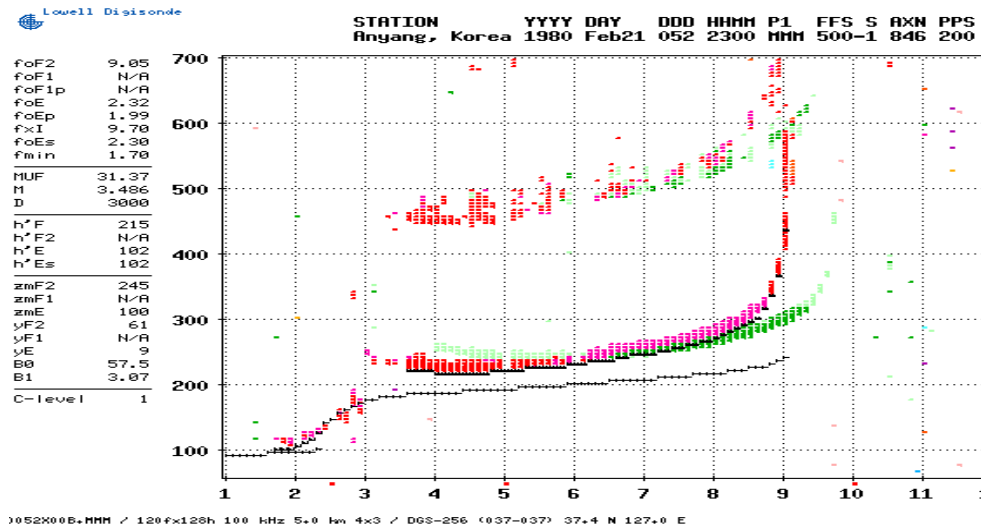
[그림4-1] 이천과 제주에 설치된 전리층 관측시스템(DPS-4D)

[표4-1] Lowell사의 DPS-4 세부 규격

DPS-4 세부규격	
Receiver	
Frequency Range	1.0~45 MHz (all modes of operation)
Bandwidth	34 kHz @ 6 dB (assuring 5 km pulse resolution)
Input Impedance	50
Noise Figure	11 dB (at receiver antenna preamplifier)
Receiver Sensitivity	-130 dBm (+/-6dB) into main chassis; greater at preamplifier (amount depending on fixed gain setting)
Spurious Free Dynamic Range	>80 dB instantaneous >120 dB total operating range including gain control
Recovery Time	70s
3rd Order Intercept	>25 dBm (unaffected by .100 dB in /out-of-band ratio)
2nd Order Intercept	>30dBm
Output	12-bit quadrature samples (16-bit after pulse compression)
DPS-4 Option	Four phase matched receivers each identical to above
RF Output	
Frequency Sweep	1-45 MHz, Start, stop and step size settable to 1kHz
Ionogram Sweep Time	VIS ionogram 60 sec (varies with programmable settings)
Frequency Synthesis	Fully digital (frequency switching time < 1.s)
Pulse Repetition Rate	50, 100 and 200 pps
Pulse Width	33 or 533.. .. s for VIS waveform, 275 ms for OIS, three waveforms all with 30 kHz signal bandwidth
Peak Pulse Power	300 W or 150 W (same in any operating mode)
Output Impedance	50 .
Transmitter Type	Dual RF MOSFET Amplifiers (second Amp either for polarized transmission or to serve as a “hot” spare)
Lightning Protection	Metal Oxide Varistor and in-line gas discharge devices

User Interface	
Unattended operation	Controlled by 7 programs, 6 schedules & 1 schedule table
Remote access & control (by Internet or modem)	Input/Output access to schedules, measurement data, or diagnostic data, and operating software
Time Setting	Integrated GPS receiver keeps time to +/-25s
Built-in Self Test (BIT)	Full diagnostics to isolate failures to replaceable units run automatically and provide remotely accessible data
Self Calibration	Built-in internal cal automatically updates phase/amplitude adjustment tables. Remotely accessible results.
Signal Processing	
Processors	Two Industrial x586's single board computers and one Texas Instruments TMS320C40 DSP board
Range Bins	128, 256 or 512
Height Range	0-2560 km (0 km used for self-calibration)
Height Resolution	5 km (reciprocal of rcvr bandwidth); 2.5, 5, 10 km sample spacing; 250 m in high range resolution measurement
Waveform Processing	Pulse compression of 16-chip phase code provides 15 dB signal processing gain, 127chip OIS code provides 24 dB
Doppler Processing	4 to 128 lines provide up to 21 dB signal processing gain
Doppler Range	+/-3 Hz to +/-50 Hz range,
Doppler Resolution	.0125 Hz
Amplitude Resolution	3/8 dB
Wave Polarization	O/X (right & left circular) or linear on transmit and receive
Standard Operating Modes	Multiplexed Swept Frequency(finest Doppler resolution) Fixed-Frequency Plasma Drift & Tilt (direction and velocities) Multi-Beam (detects off-vertical echoes)* Precision Group Height (Phase Ionogram)* Oblique incidence sweep (no transmission at rcvr station)

Receiver Antennas	
Antenna Type	Active Crossed loops . Turnstile antenna (1.5 m diameter)
Antenna Array	4 antennas in 60m triangle with central antenna
Construction	Schedule 80 PVC, with wire braid loop elements
Electronics	Preamplifier (powered via RF cable) with Electronically switched polarization combining, selectable gain 10-30 dB
Pre-Amplifier Sensitivity	-123 dBm (in 34 kHz bandwidth, no signal processing)
Pre-Amplifier Gain	
Transmitter Antenna (optional)	
Antenna Type	Vertical Crossed Rhombic or Delta (2 radiating elements)
Tower	20 . 60 m height (typically supplied by user)
ADEP - Ionogram Editing Workstation (optional)	
Computer Hardware	Pentium II, 17" monitor, CD-ROM R/W, Color Printer, Tape Cartridge drive
Computer Software	Windows NT 4.x
Ionogram Editing	SAO Explorer
Profile Inversion	NHPC . Inverts ionogram traces to N(h) profiles
Conversion Software	Sbf2gif - Ionogram to GIF file converter
Software (included with system)	
System Software	Windows NT 4.x
WEB Server	Netscape, and programs to update ionogram data
Operating Software	DpsCntl, Dispatcher, CWFFT9(DSP), GPS interface etc
ARTIST	Automatic Real-Time Ionogram Scaling with True Height
	Analysis (ARTIST)
Software (provided free of charge by UMLCAR)	
DDA	Drift Analysis, Skymap and Velocity Analysis
ShowDrift	Drift Analysis data browser



[그림4-2] Ionosonde 관측 데이터

전리층 송수신 시스템(3~10MHz)을 통해 연중 실시간 1시간 간격으로 전리층 높이 측정한다. 전리층 높이는 전리층 반사 효과를 사용하여 원거리 HF 통신을 위한 공중선출력, 안테나패턴 등과 함께 중요한 송·수신 파라미터를 나타낸다. 태양활동이 없는 일반적인 경우 안정적인 전리층 높이를 유지하나 강력한 태양흑점 폭발이 발생한 경우 전리층 높이가 변하거나 전리층이 일시적으로 사라지므로 관측자료를 통해 우주전파환경 이상 징후 예측한다. [그림4-2]는 Ionosonde로 관측한 결과를 나타낸 그림을 Ionogram이라고 부르며 전리층에서 반사되어 온 전파가 수신된 결과를 나타낸다.

나. 전리층 관측 문제점

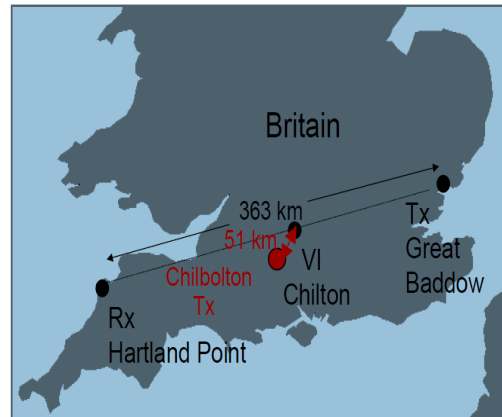
국내에서는 우주전파센터가 유일하게 전리층 관측장비를 보유하여 운영하고 있다. 현재 이천과 제주(남북방향)에 설치된 Ionosonde 관측기는 설치된 지역에서 수직으로 전파를 송수신하여 관측하므로 설치된 인근 지역에 대한 전리층만 관측할 수 있어 한반도 전역에 대한 관측이 어려운 상황이다. 따라서 한반도 전역에 대한 전리층 상태를 파악하기 위해서는 동서방향에 관측기 추가 설치가 요구된다. 그러나 Ionosonde 관측기의 안테나 높이 30 m 정도로 기존 관측기를 설치하기 위해서는 상당히 넓은 면적이 필요하므로 부지확보 측면에서 어려운 상황이다.

최근 여러 나라에서는 넓은 지역의 전리층을 관측하기 위해 사입사 기술을 개발하고 있다. 사입사란 수직으로 송수신하지 않고 사선형으로 들어온 전파를 분석하여 전리층을 파악하는 기술을 말한다. 영국에서는 2000년에 사입사를 통한 전리층 상태를 파악하기 위한 시스템을 개발하였다. 사입사 관측시스템을 통해 Hartland와 Great Baddow의 363km 떨어진 거리에서 송수신하여 중간지역인 Chilton 지역의 전리층을 관측하였다. 또한 최근 일본에서는 사입사 관측을 위한 전리층 관측시스템을 개발을 착수하였다. [그림4-3] (c)은 영국에서 개발한 사입사 전리층 관측시스템 및 관측 결과이다.

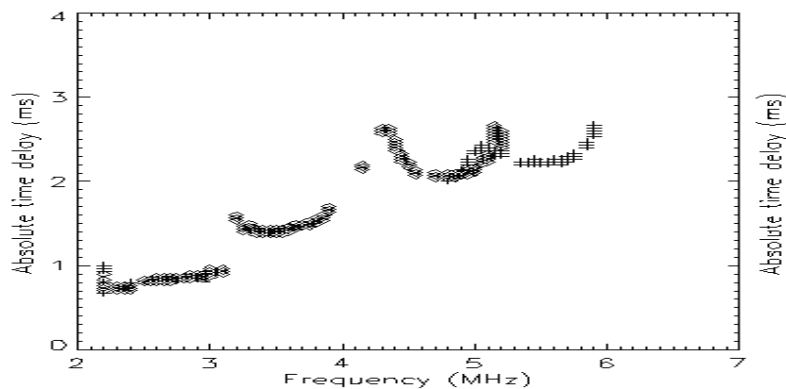
따라서 국내에서도 사입사 관측을 위한 기술을 개발하여 한반도 전역에 대한 전리층을 실시간 관측할 수 있도록 하여야 한다.



(a) 영국의 사입사 관측시스템



(b) 영국의 사입사 측정 지역



(c) 영국의 사입사 전리층 측정 결과

[그림4-3] 영국의 사입사 전리층 관측시스템 및 관측 결과

2. 단파통신을 위한 전리층 예측모델 현황 및 문제점

가. 단파통신을 위한 전리층 예측모델 운용 현황

우주전파센터는 단파통신 최적주파수 정보 제공을 위해 VOACAP(Voice of America Coverage Analysis Program) 모델을 사용하고 있다. VOACAP 모델은 장거리 통신 및 방송 중계를 위한 단파통신 전리층 모델로 미국에서 1980년대 IONCAP(Ionospheric Communication Analysis and Prediction Program) 모델을 기초로 개발되었다. IONCAP 모델은 1920년대에 미국에서 아마추어, 단파통신 등 장거리통신 사업자에 의해 개발되었으며 foE, foF1, foF2 등 전리층 정보를 반영하여 송수신기 출력 등 파라메타에 대한 정보를 제공하는 모델이다.

VOACAP 모델은 입력정보는 출력, 송수신 안테나 이득 등 주로 통신시스템 파라메타이며 전리층 정보는 1개월간 흑점 수만을 입력하여 전리층 높이 등을 계산한다. 따라서 전리층 높이, F층 주파수 등이 1개월간 동일하게 나타나므로 태양활동이 변화할 경우 이를 반영하지 못하게 된다. [그림 4-4] (a)은 VOACAP 모델에서 입력창을 나타내며 [그림 4-4] (b)는 전리층 정보를 제공하기 위한 1개월간 흑점개수와 흑점번호 입력창이다.

VOACAP Point-to-Point data input

File Run View Save to: Help

Method: 30 = Short/Long method smoothing (7-10000 km)

Year: 2005 Coefficients: CCIR (Oslo)

Time: 01 to 24 by 1 hours UT

Groups: Month.Day= 11.00 SSN = 24

Transmitter: 40.75N 74.00W 4U UN HQ (NY)

Receiver: 14.92N 23.52W D4 Cape Verde

Path: Short Distances: 5633km 3041nmi 3500mi Azimuth: 105.5deg

Freq(MHz): 3.500 7.000 10.100 14.100 18.100 21.100 24.800 28.100

System: Noise Min Angle Req.Rel. Req SNR Multi Tol Multi Del
155 (-dBw) 0.10deg 90% 27dB 3.00dB 0.10msec

Eprob: 1.00*foE 1.00*foF1 1.00*foF2 0.00*foEs

Ix Antenna: # Min Max Design Directory\Filename.sfx Model MainBeam Power kW
1 2 30 6.000 samples \SAMPLE.44 HF MUFES#44 105.5 1.0000

Ex Antenna: default \SWWHIP.VOA 310.9deg 0.00dB

Input Help:

(a) VOACAP 입력창

	Months	SSNs
1	12.00	110
2	0.00	0
3	0.00	0
4	0.00	0
5	0.00	0
6	0.00	0
7	0.00	0
8	0.00	0
9	0.00	0
10	0.00	0

(b) 1개월간 흑점수와 흑점번호 입력창

[그림4-4] VOACAP 입력 파라메타

나. 단파통신을 위한 전리층 예측모델 문제점

현재 우주전파센터에서 제공되는 전리층 관련 서비스는 VOACAP 모델을 이용한 점대점 통신 최적주파수 및 전리층 관측기의 관측값 제공하고 있다. 그러나 VOACAP 모델에서 전리층 정보는 1개월간 평균 흑점개수만을 적용하므로 이에 따른 주파수가 1개월간 동일하게 적용됨으로 신뢰성 떨어진다. 또한 제주와 이천의 관측기를 통한 전리층 관측값 제공서비스는 특정지역의 전리층 정보이므로 실제 이용자가 매우 저조한 실정이다. 국내 전리층 관측기를 추가 설치하더라도 해당 지역의 관측값을 제공할 뿐 VOACAP을 이용한 최적주파수 제공에는 적용되지 않게 된다. 따라서 VOACAP은 관측값을 실시간 적용 기능이 없으므로 실시간 최적주파수 제공을 위해서는 IRI 과 같은 국제표준 모델 기반의 전리층 관측자료를 동화한 전리층 예측모델 개발이 필요한 상황이다.

제3절 단파통신 최적주파수 실시간 제공 방안

1. 사업사 전리층 관측시스템 개발

한반도 전역에 대한 전리층 관측을 통해 실시간 전리층 상태를 파악하여 단파통신 최적주파수 제공을 위해서는 여러 지역에서 관측하여야 한다. 이에

기존의 전리층 관측기 데이터 활용도를 높이고 단파통신을 위한 최적주파수를 실시간 제공하기 위해 본 과제에서 관측기 추가 설치 방안을 제시하고자 한다.

기존의 Ionosonde 관측기를 여러 지역에 설치할 경우 예산 및 부지 확보 측면에서 비효율적이다. 따라서 기존 관측기를 활용하고 예산 및 부지 확보 측면을 고려할 때 Ionosonde 수신기만을 개발 또는 구매 설치하여 사업사 관측을 한다면 효율적으로 한반도 전역을 관측할 수 있을 것이다. 이를 위해 Ionosonde 관측기 개발자인 미국의 로엘대학과 MOU 등을 통한 상호협력으로 사업사 관측기술을 개발하여야 할 것이다.

2. 국제표준 전리층 모델 기반의 관측자료 동화모델 개발

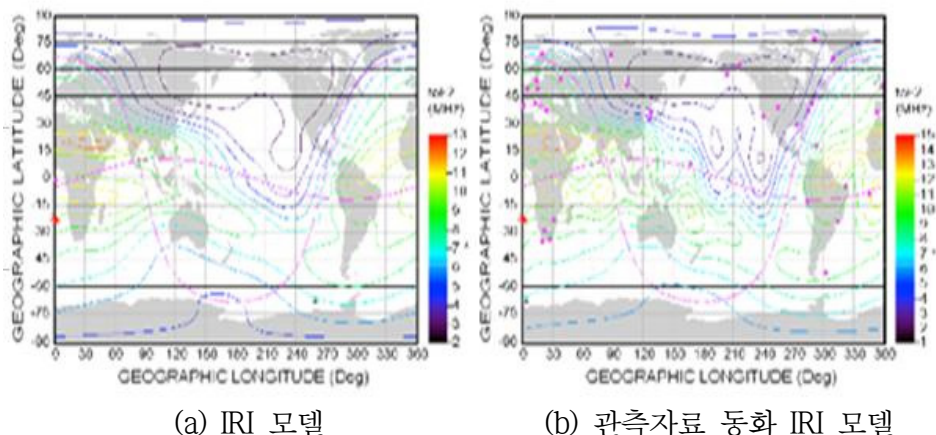
현재 우주전파센터에서 제공하는 단파통신을 위한 예측모델은 미국에서 개발된 VOACAP모델을 사용하고 있다. VOACAP모델은 전리층 통신을 위한 모델로 주로 송수신 통신시스템 파라미터를 중심으로 설계된 모델이므로 전리층 정보는 단순히 한 달간 흑점의 개수를 통해 제공되어 정확도가 떨어지므로 신뢰성을 높이기 위한 방안이 필요한 상황이다.

현업에 이용되는 대부분의 모델은 장기간의 관측자료를 바탕으로 하는 경험적 모델이며, 모델의 출력 인자에 따라 주파수, 전리권 최대밀도, 전리권 최대밀도 고도 등을 산출하고 있다. 그러나 전리권의 상태를 3차원으로 감시할 수 있는 역학적 모델은 전 세계적으로 아직 개발되어 있지 않은 상황이다. 전리권의 예측을 위하여 사용되는 모델은 크게 경험적 모델과 역학적 모델이 있지만 현재까지 전리권의 물리량을 정밀도 높게 선행 시간 24시간 이상으로 정밀하게 예측하는 모델은 전 세계에 존재하지 않는다. 특히 물리적 모델은 경험적 모델에 비하여 실용적인 목적에서 정밀도에서 크게 성능이 낮은 현실이다. 하지만 경험적 모델은 적용하기에 쉽고 비교적 높은 정밀도를 보장하나 장기간의 관측자료를 바탕으로 하여야 함으로 현재의 정밀도를 높은 수준으로 향상시키기 위한 개선의 가능성이 낮다. 따라서 세계 각국의 전리권 연구자들은 자료 동화라는 새로운 방법으로 모델의 정밀도를 개선하는 방향을 잡고 있다. 자료 동화란 현재의 관측자료를 통계적인 기법을 통하여 물리적 모델 혹은 경험적 모델에 적용하여 현재의 관측자료와 가장 근사치한 접근으로 예측 모델의 정밀도를 향상시키는 방법이다. 이러한 움직임에 따라 전 세계 전리권 모델의 선구자들은 모두 각 기관 고유의

동화자료 기법을 이전의 모델에 결합하여 사용하고 있는 실정이다. 이러한 대표적인 동화모델로는 USU의 GAIM(Global Assimilative Ionospheric Model) 등이 활발하게 개발 중에 있다.

자료동화모델의 핵심은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째는 자료 동화 기법을 얼마나 전리권의 물리적 혹은 경험적 모델의 제한조건과 결합시켜 성능을 개선할 수 있는가이며, 둘째로 자료 동화 기법이 적용될 양질의 전리권의 관측자료를 확보 가공할 수 있는가의 문제이다. 따라서 전리권 자료 동화 모델 개발에서 핵심이 되는 문제 중의 하나는 바로 현재 전리권의 정보를 어떤 장비로 얼마나 정확하게 관측할 수 있는 것이 관건이다. 이러한 의미에서 전리권 관측기의 추가설치와 관련하여 만약 추가로 관측되는 전리권의 물리량 들이 미래에 얼마나 모델 개선에 이바지 할 수 있는가의 문제는 반드시 고려해야 할 사항이다.

대표적인 자료 동화 모델의 관측자료는 이온존데가 있다. 특히 최근 발표된 IRI-2012에서는 이온존데 관측자료를 활용하여 관측자료 동화모델로 개발하였다. IRI-2012 모델은 전 세계 이온존데 네트워크 자료를 이용하여 성능을 개선하고 있다. [그림4-5]은 39개 전 세계 관측소의 Ionosonde 관측자료를 이용하여 동화자료 모델을 개발하였는데 이는 기존의 월간 평균값을 모델 결과와는 달리 실시간으로 전리권의 관측자료를 동화처리 함으로써 더욱 정밀도 높은 모델 결과를 보여주고 있다.



[그림4-5] IRI모델에 Ionosonde 관측자료를 이용한 자료동화 IRI 모델

따라서 현재 한반도에서 운용하고 있는 이온존데의 관측 성능을 개선하고 신뢰도 높은 관측 결과를 도출함으로써 향후 한반도의 지역 전리권 모델 개발 뿐 만아니라 전 세계 관측자료를 결합하여 관측자료 동화 모델을 개발하여야 한다. 따라서 전리층 관측자료 동화 모델 개발을 통해 국내 및 동남아 지역까지 전리층을 이용한 단파통신을 위한 최적주파수를 실시간 제공할 것으로 사료된다.

제5장 결 론

태양활동은 11년을 주기로 극대기를 맞이하며 2013년부터 극대기가 시작할 것으로 예측된다. 이에 태양활동의 변화에 따른 지구영향에 대해 많은 국가들은 연구하고 대처방안을 마련 중에 있다.

본 연구에서는 태양활동에 따른 우리나라 전역에 대해 보다 정확한 전리층 변화 영향 분석 및 예측하기 위한 방안을 연구하였다. 우선 전리층 개념 및 특성을 조사하고 레이더, 위성, 예측모델을 통한 전리층 관측방법을 조사하였으며, 전리층 관련 국내 기관과 네트워크 연계를 통한 GPS 관측자료 연계망을 구축하였다. 특히 한국천문연구원, 국토지리정보원, 위성항법중앙사무소에서 운영 중인 GPS 관측소를 연계하여 우주전파센터에서 전리층 관측자료를 통합 수집하도록 하였다. 통합 수집된 자료를 기반으로 우리나라 전역에 대한 전리층 총전자량, 연간 변화량, 시간단 총전자량 변화값 등을 우주전파센터 홈페이지를 통해 정보를 제공하도록 하였다. 또한 단파통신을 위한 실시간 최적주파수 제공을 위한 방안을 제시하였다. 첫째, 전리층 관측장비 측면에서는 예산절감 및 부지 확보를 고려하여 사립사 관측을 통한 전리층 관측 기술 및 시스템 개발을 수행하여야한다. 둘째, 전리층 예측모델 측면에서는 최근 발표된 IRI-2012를 도입하여 국내 관측자료를 기반의 동화모델을 개발하여 실시간 전리층 분석 및 예측할 수 있도록 하여야한다.

본 연구를 통해 국내 기관의 GPS 관측소를 연계하여 우리나라 전역에 대한 전리층 총전자량 등 전리층 정보 제공함에 따라 군, 위성, 항공사 등 다양한 수요기관에서는 보다 정확하고 실질적인 전리층 정보를 이용할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 제시된 단파통신을 위한 실시간 최적주파수 방안을 통해 우주전파센터는 향후 국내 및 아태지역에 단파통신 최적주파수를 실시간 제공이 가능해짐에 따라 항공사 및 군 등 수요기관은 보다 정확한 단파통신 주파수를 사용할 것으로 사료된다.

[참고문헌]

- [1] 이동훈 외 , 2006, “태양폭발 등 우주전파환경 변화에 대비한 대응 방안 연구” 전파연구소 발간
- [2] 민경욱 외, 2001, “우주전파환경 변화에 의한 국내 위성, 무선 통신 영향 연구”, 전파 연구소
- [3] Farley, D. T., H. M. Ierkeic, and B. G. Fejer (1981), Radar interferometry : A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere, J. Geophys. Res., 101, 5177.
- [4] Galkin, I. A., G. M. Khmyrov, A. Lozlov, B. W. Reinish, X. Huang and D. F. Kitrosser, 2006, Ionosonde networking, databasing and Web serving, Radio. Sci., 41, RS5S33
- [5] Huang, C. S. and M. C. Kelley, 1996, Numerical simulations of gravity wave modulation of midlatitude sporadic E layers, J. Geophys. Res., 101, 24,533.
- [6] Garcia, F. J., M. C. Kelley, J. J. Makela and C. S. Huang, 2000, Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at mid-latitudes, J. Geophys. Res., 105
- [7] Hummer, Z. C. J. Russel, P. L. Dyson and J. A. Bennett, 1996, Study of Sporadic E layer by backscatter radar, Ann. Geophys., 14, 1060.
- [8] Hysell, D. L., M. F. Larsen, and Q. H. Zhou , 2004, Common volume coherent and incoherent scatter radar observation and equatorial spread F, Ann. Geophys., 22, 4061.
- [9] Kagan, L. M., T. Ogawa, S. Fukao, and M. Yamamoto, 2000, A role of neutral motions in formation of midlatitude E-region field-aligned irregularities, Geophys. Res. Lett., 27, 939-942.
- [10] Kelley, M. C., J. J. Makela, B. M. Ledvina, and P. M. Kintner, 2002, Observations of equatorial spread-F from Haleakala, Hawaii, Geophys. Res. Lett., 29.

- [11] Kelley, M. C., and C. A. Miller, 1997, Electrodynamics of midlatitude spread F 3. Electrodynamic waves? A new look at the role of electric field in thermospheric wave dynamics, J. Geophys. Res., 102, 11,539.
- [12] Kintner, P. M. and B. M. Ledvina, 1997, "The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems", private communication.
- [13] Kintner, P. M., B. M. Ledvina, and E. R. de Paula, 2007, GPS and Ionospheric Scintillation, Space weather in preparation.
- [14] Kudeki, E., B. G. Fejer, D. T. Farley, and H. M. Ierkeic (1981), Interferometer studies of equatorial F region irregularities and drifts, Geophys. Res. Lett., 8, 377.
- [15] Ledvina, B. M., J. J. Makela, and P. M. Kintner, 2003, First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude., Geophys. Res. Lett., 29, 1659.
- [16] Maeda, K., T. Tsuda and H. Maeda, 1963, Theoretical interpretation of the equatorial sporadic E layers, Phys. Rev. Lett., 11. 406-407.
- [17] Makela, J. J., and M. C. Kelley, 2003, Field-aligned 777.4-nm composite airglow images of equatorial plasma depletion.
- [18] Mendillo, M., J. Baumgardner, D. Nottingham, J. Aarons, B. Reinish, J. Scali, M. C. Kelley, 1997, Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300- AA images from the Arecibo observatory, J. Geophys. Res., 102, 7331
- [19] Ogawa, T., O. Takahashi., Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto, and K. Kita, 2002, Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude E region irregularities and sporadic E layer., J. Geophys. Res., 107, 1275

- [20] Ogawa, T, M. Yamamoto, and S. Fukao, 1995, Middle and upper atmosphere radar observations of turbulence and movement of midlatitude sporadic E irregularities, *J. Geophys. Res.*, 100, 12,173-12188.
- [21] Otsuka, 2007, private communication
- [22] Otsuka, Y, F. Onoma, K. Shiokawa, T. Ogawa, M. Yamamoto, and S. Fukao, 2007, Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E region field-aligned irregularities at midlatitude, *J. Geophys. Res.*, 112
- [23] Rao, P. B., M. Yamamoto, A. Uchida, I. Hassenpflug, and S. Fukao, 2000, MU radar observations of kilometer-scale waves in the midlatitude lower E-region, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1813-1816.
- [24] Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, M. Kubota, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Tsugawa, T. Ogawa, M. Ishii, T. Sakanoi, and S. Miyazaki, 2001, Traveling ionospheric disturbance detected in the FRONT campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 680.
- [25] Scali, J. L., B. W. Reinisch, C. J. Heinselman and T. W. Bullett, 1995, Coordinated digisonde and incoherent scatter radar F region drift measurements at Sondre Stromfjord, *Radio Sci.*, 30, 1481.
- [26] Sojka, J. J., D. Rice, J. V. Eccles, F. T. Berkey, P. Kintner, and W. Denig, 2004, Understanding midlatitude space weather: Storm impacts observed at Bear Lake Observatory on 31 March 2001, *Space Weather*, 2, S10006.
- [27] Su, S. .Y., H. Liu, H. H. Ho, and C. K. Chao, 2006, Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities : Equatorial versus midlatitude regions, *J.*

- [28] Geophys. Res., 111, A060305
- [29] Taylor, M. J., and M. B. Bishop, 1995, All-sky measurements of short period waves imaged in the O I (555.7 nm), and near infrared OH and O₂(0,1) nightglow emissions during the ALOHA-93 campaign, Geophys. Res. Lett., 22, 2833.
- [30] Tsugawa, 2007, private communication
- [31] Tsunoda, R. T., S. Fukao, and M. Yamamoto, 1994, On the origin of quasi-periodic radar backscatter from midlatitude sporadic E, Radio. Sci., 29, 349.
- [32] Tsuda, T., T. Sato, and K.-I. Maeda, 1966, Formation of sporadic E layers at temperate latitude due to vertical gradients of charge density, Radio. Sci. 1, 212-225.
- [33] Won, Y.-I, G. G. Sivjee, S. M. I. Azeem, and Q. Wu, 2007, Tidal features in the wintertime mesospheric temperature and neutral winds recorded at Resolute Bay, Canada, J. Atmos. Solar-. Terr. Physics., 69, 459
- [34] Woodman, R. F. (1997), Coherent radar imaging : Signal processing and statistical properties, Radio Sci., 32, 2373.
- [35] Woodman, R. F., M. Yamamoto., and S. Fukao, 1991, Gravity wave modulation of gradient drift instabilities in mid-latitude sporadic-E irregularities, Geophys. Res. Lett., 18, 1197.
- [36] Wu, D. L., C. O. Ao, G. A. Hajj, M. T. Juarez, and A. J. Manucci, 2005, Sporadic E morphology from GPS-CHAMP radio occultation, J. Geophys. Res., 110.
- [37] Wu, Q, R. D. Gablehouse, S. C. Solomon, T. L. Killeen, and Chiao-Yao She, 2007, A New Fabry-Perot Interferometer for Upper Atmosphere Research, private communication.
- [38] Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato, 1991, Mid-latitude E-region field-aligned irregularities observed with the MU radar, J. Geophys. Res.,

96, 15,943-15,949.

- [39] Yamamoto, M., S. Fukao, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato, 1992, A morphological study of mid-latitude E-region field-aligned irregularities observed with the MU radar, J. Atmos. Terr. Phys., 54, 769-777.
- [40] Yamamoto, M. N, Kmota, S. Fukao, R. T. Tsunoda, T. Ogawa and T. Tsuda, 1994, Spatial structure of the E region field-aligned irregularities revealed by the MU radar, Radio. Sci, 29,337-347.
- [41] Yamamoto, M. N., I Tetsuya, T. Kishimoto, R. T. Tsunoda, R. F. Pfaff. And S. Fukao, 1998, Comparison of E-region electric field observed with a sounding rocket and a Doppler radar in SEEK campaign, Geophys, Res. Lett, 25, 17

우주전파환경 관측자료 데이터
연계방안에 관한 연구



140-848 서울시 용산구 원효로41길 29

발 행 일 : 2012. 12.

발 행 인 : 이 동 형

발 행 처 : 방송통신위원회 국립전파연구원

전 화 : 02) 710-6555

인 쇄 : 한국장애인이워크협회

Tel. 02) 2272-0307

ISBN : 978-89-97525-06-5-93560 < 비 매 품 >

주 의

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.