

# 국제표준 전리층 최신모델 검증 및 국내 적용기준 마련 연구

2013. 12.

# 제 출 문

본 보고서를 「국제표준 전리충 최신모델 검증 및 국내 적용  
기준 마련 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2013. 12. 31.

연구책임자 : 김영규(전파자원기획과 연구개발팀)

연구원 : 이환상(전파자원기획과 연구개발팀)

문준철(전파자원기획과 연구개발팀)

한진욱(전파자원기획과 연구개발팀)

김수철(전파자원기획과 연구개발팀)

## 요 약 문

본 연구에서는 국제표준 전리층 최신모델인 IRI-2012를 전리층 관측자료가 반영되도록 개선하고 개선된 IRI-2012 모델을 단파통신 예보모델인 VOACAP 모델에 적용하여 실시간 단파통신 최적주파수를 제공하기 위한 연구를 수행하였다.

우선 국내 단파통신 주파수 이용현황 및 무선국 사용현황을 조사하였고 현재 우주전파센터에서 제공 중인 단파통신 서비스에 대한 현황 및 문제점을 분석하였다. 또한 국내 전리층 관측자료를 장기 및 단기 변화 특성을 분석하고 태양활동에 따른 전리층 변화 특성을 분석하였다. 그리고 국제표준 전리층 모델인 IRI-2012에 대한 특성 및 파라미터를 분석하였으며, IRI-2012 예측값과 관측값을 비교 분석하였다. 또한 IRI-2012에 관측값이 적용되도록 개선하고 개선된 IRI-2012에 대한 검증을 실시하였다. 마지막으로 개선된 IRI-2012 모델을 단파통신 예보모델인 VOACAP 모델에 적용되도록 개선 및 검증하였으며 홈페이지를 통해 실시간 단파통신 최적주파수가 산출되도록 단파통신 서비스를 개선하였다.

본 연구는 실시간 전리층 정보를 반영한 단파통신 최적주파수를 실시간 및 24시간 예측 주파수를 제공할 수 있도록 단파통신 서비스를 개선하였다. 본 연구를 통해 개선된 단파통신 서비스는 국내에서 단파통신을 주로 사용하는 군이나 선박 등에서 매우 유용하게 사용될 것으로 사료된다. 특히 지점대지점 단파통신 서비스 국내 지역에서 군의 정기교신 및 훈련 또는 수협에서 인근바다에 선박을 대상으로 하는 어업방송에 유용하게 사용될 것으로 사료되며, 지점대지역 단파통신 서비스는 먼 바다에서 운용되는 선박 등을 대상으로 하는 어업방송에 활용도가 매우 높을 것으로 사료된다.

# SUMMARY

In this study, We developed real-time assimilation model and applied real-time assimilation model to Voice of America Coverage Analysis Program(VOACAP) in order to produce real-time HF Communication frequency.

First, We investigated usage frequency of HF Communication and analyzed problem currently providing services for HF Communication. In addition to We analyzed domestic ionospheric observations data to understand the characteristic trends of the long-term and short-term changes. We analyzed the characteristics and parameters of IRI-2012 model, and compared predicted values of IRI-2012 with observed values. Finally, We developed real-time assimilation model applied domestic observation data and improved VOACAP model that it produced real-time the optimum frequency of HF Communication.

The improved HF Communication service offered real-time frequency and prediction frequency after 24 hours of HF Communication. We think that these service used available at military training and management fishing ships.

# 목 차

제1장 서론 .....	1
제2장 단파통신 현황 및 문제점 .....	2
제1절 단파통신 개념 .....	2
제2절 단파통신 이용현황 .....	2
제3절 단파통신 서비스 제공 현황 및 문제점 .....	4
제3장 국내 전리층 관측자료 분석 .....	23
제1절 전리층 개념 .....	23
제2절 전리층 관측기 운용현황 .....	23
제3절 국내 전리층 관측자료 분석 .....	32
제4장 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 분석 및 개선 .....	37
제1절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 특성 및 파라미터 분석 ..	37
제2절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 예측값과 관측값 비교분석	37
제3절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 개선 및 검증 .....	38
제5장 실시간 단파통신 최적주파수 제공 .....	34
제1절 단파통신 예보모델 개선 .....	34
제2절 개선된 단파통신 예보모델 검증 .....	35
제3절 실시간 단파통신 최적주파수 서비스 제공 .....	37
제6장 결 론 .....	55
참고문헌 .....	50

## 표 목 차

표 2-1 단파통신 사용기관 현황 .....	22
표 4-1 관측자료 동화 기법 비교표 .....	25
표 5-1 VOACAP 주요 서브루틴 .....	33

## 그 립 목 차

그림2-1 단파통신 주파수 산출 .....	3
그림2-2 단파통신 주파수 이용현황 .....	4
그림2-3 단파통신 무선국 이용현황 .....	4
그림2-4 국내 주요지점간 월간예보 .....	6
그림2-5 국외 주요지점간 월간예보 .....	6
그림2-6 지점대지점 단파통신 서비스 .....	7
그림2-7 지점대지역 단파통신 서비스 .....	7
그림2-8 IRI모델과 IRI 동화모델 .....	9
그림3-1 전리층 구성 .....	10
그림3-2 전국 관측기 운용현황 .....	12
그림3-3 전리층 관측기 .....	12
그림3-4 이오노그램 .....	13
그림3-5 국내 전리층 장기 변화 분석 .....	14
그림3-6 이천,제주 관측자료 월별 분석 .....	15
그림3-7 계절별 이천,제주 hmF2 및 foF2 분석 .....	16
그림3-8 DIGISONDE 관측기 위도별 위치 .....	17
그림3-9 위도별 foF2 비교분석 .....	17
그림3-10 지자기 교란시 foF2 분석 .....	18
그림4-1 IRI 모델의 입출력 정보 .....	19
그림4-2 IRI - 2012 모델의 코드 구조 및 관계도 .....	20
그림4-3 이천 관측값과 IRI-2012 예측값 비교 .....	21
그림4-4 제주 관측값과 IRI-2012 예측값 비교 .....	21
그림4-5 안양,이천 관측값과 IRI-2012 비교 .....	22
그림4-6 관측값과 IRI-2012 비교분석 .....	22
그림4-7 IRI-SIRMUP 동화모델의 동화자료 관측지점 .....	24
그림4-8 IRI 동화모델의 지자기폭풍 기간중 foF2 관측결과	24
그림4-9 IRI-RTAM 기법 .....	25

그림4-10 IRI-RTAM의 미관측지점 보간 기념도 .....	25
그림4-11 이오노존데 자료 품질관리 결과 .....	27
그림4-12 IRI 개선 개념도 .....	28
그림4-13 전리층 동화모델 성능 시험 개념도 .....	29
그림4-14 태양활동이 없는 기간의 3/6/24시간 관측자료결과 ..	29
그림4-15 태양활동이 활발한 기간의 3/6/24시간 관측자료결과 ..	30
그림4-16 3/6/24시간 RUSE 값 비교 .....	30
그림4-17 이천/제주 관측값과 IRI 동화모델 비교분석 .....	31
그림5-1 VOACAP 서비스화면 .....	32
그림5-2 VOACAP 모델 입출력 .....	33
그림5-3 VOACAP 기반 최적주파수 맵핑 모듈 개념도 .....	34
그림5-4 지자기 교란 유무에 따른 VOACAP 모델 검증 .....	35
그림5-5 실시간 단파통신 최적주파수 제공 서비스 흐름도 ....	35
그림5-6 최적주파수 산출 시스템의 지점대지점 사용자화면 ....	36
그림5-7 최적주파수 산출 시스템의 지점대지점 사용자화면 ....	36



# 제1장 서론

국내에서 단파통신은 군, 선박, 항공사 등 다양한 분야에서 여전히 사용되고 있다. 단파통신은 전리층 반사를 이용하여 저전력으로 원거리 통신하는 방식으로 전리층 상태에 따라 사용하는 주파수가 달라지게 된다. 전리층은 태양의 X선 등에 의해 시간대별 및 계절별로 수시로 변화하는 특징이 있다. 그러나 단파통신 사용자들은 전리층 상태 정보를 적용하지 않고 사용함으로써 단파통신 사용에 많은 어려움이 발생하게 된다. 또한 VOCAP 등 단파통신 예측 모델을 사용할 경우에도 모델 자체가 과거 데이터를 기반으로 한 통계수치이므로 현재의 전리층 상태를 반영하지 못해 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 정확한 단파통신 가용주파수를 확보하기 위해서는 전리층 관측값을 적용한 단파통신 주파수를 사용하여야 한다.

본 연구에서는 단파통신 사용을 원활히 하기 위해 실시간 전리층 관측정보를 이용하여 보다 정확한 단파통신 주파수를 제공하고자 한다. 이를 위해 최근 발표된 국제표준 전리층 모델인 IRI-2012를 관측자료로 동화하여 한반도 전역에 대해 위도별 실시간 전리층 상태를 도출하였다. 또한 실시간 전리층 상태를 단파통신 예측모델인 VOACAP 모델에 적용하여 실시간 단파통신 주파수를 산출하였다.

2장에서는 국내 단파통신 이용현황을 조사하고 현재 우주전파센터에서 제공 중인 단파통신 서비스 현황 및 문제점을 분석하였다.

3장에서는 우주전파센터에서 운영 중인 전리층 관측기 현황과 그간 수집된 국내 관측자료를 장기 및 단기적인 변화 특징을 분석하고 태양활동이 활발한 시기와 미미한 시기에서 전리층 변화 특징을 분석하였다.

4장에서는 국제표준 전리층 모델인 IRI-2012에 대한 특징과 파라미터를 분석하고 IRI-2012 예측값과 관측값을 상호 비교하였다. 또한 관측값을 IRI-2012에 동화하여 개선하고 동화모델에 대해 관측값과 비교하여 검증하였다.

5장에서는 개선된 IRI-2012를 단파통신 예측모델인 VOACAP 모델에 적용하여 개선하였으며 개선된 VOACAP 모델에 대한 검증을 실시하였다.

6장에는 개선된 단파통신 예측모델을 통한 실시간 단파통신 서비스 제공 방안을 제시하였다.

## 제2장 단파통신 현황 및 문제점

### 제1절 단파통신 개념

단파통신은 3~30MHz 주파수를 통해 저전력으로 원거리 통신하기 위해 전리층 반사를 이용하는 통신 방식이다. 수신 전계강도는 주파수 및 전리층 상태에 따라 크게 달라지게 되는데 전리층은 시간, 계절별 등에 따라 수시로 변화하므로 원활한 단파통신을 위해서는 전리층 상태 예측이 매우 중요하다 할 수 있다.

단파통신은 송수신간 거리에서 통상 중간지역의 전리층을 반사하여 통신하게 된다. 따라서 원활한 단파통신을 위해서는 송수신간 중간지역 전리층을 관측하여 반사주파수를 분석하여 사용하여야 한다.

그림2-1은 단파통신 개념도로 단파통신 주파수를 선정하기 위해 송수신간 거리에서 중간 지역의 전리층의 전리층 높이 및 임계주파수를 관측하여 단파통신의 최대사용주파수(MUF), 최소사용주파수(LUF), 최적사용주파수(FOT)를 선정하여 사용하여야 한다. 여기서 최대사용주파수(MUF)는

$$MUF = foF2 \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2hmF2}\right)^2}$$

foF2는 F2층은 임계주파수, hmF2는 F2층 높이, d는 송수신간 거리이다.

최대사용주파수(MUF)는 송수신간 거리가 주어졌을 때, 전리층 반사파를 사용하여 통신 할 수 있는 상한의 주파수로 전리층을 통과 및 반사하는 경계주파수가 된다.

또한 최소사용주파수(LUF)는

$$LUF = f_{min} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2hmF2}\right)^2}$$

Fmin은 관측 최소주파수, hmF2는 F2층 높이, d는 송수신간 거리이다.

최소사용주파수(LUF)는 송수신간 거리에서 전리층 반사파를 사용하여 통신 할 수 있는 최저주파수를 말하며 LUF보다 낮은 주파수는 모두 전리층 반사를 할 수 없게 된다.

그리고 최적사용주파수(FOT)는  $FOT = MUF \times 0.85$ 이다.

최적사용주파수(FOT)는 전리층 반사를 이용하기 위한 최적의 주파수로 MUF와 LUF 사이에 존재하며 MUF의 85%로 결정된다.

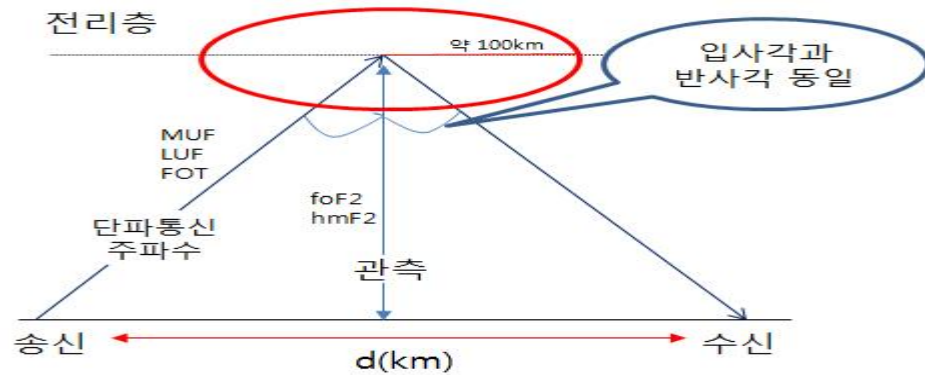


그림2-1 단파통신 주파수 산출

## 제2절 단파통신 이용현황

단파통신은 3~30MHz대역에서 전리층 반사를 이용하여 저전력으로 원거리 통신하는 방식으로 선박, 아마추어, 항공 등에서 주로 이용하고 있다. 주파수 이용현황은 그림2-2와 같이 총 사용주파수는 3,105파이며, 민간 1,769파, 군 1,336파를 사용중에 있으며, 민간에서는 선박/해양경찰/항공, 군에서는 육군에서 주로 사용하고 있다. 무선국 이용현황은 그림2-3와 같이 총 176,978국이 사용되고 있으며, 민간은 175,003국, 군 1,975국을 사용 중에 있으며 민간에서는 선박/항공/아마추어, 군에서는 육군에서 주로 사용하고 있다.

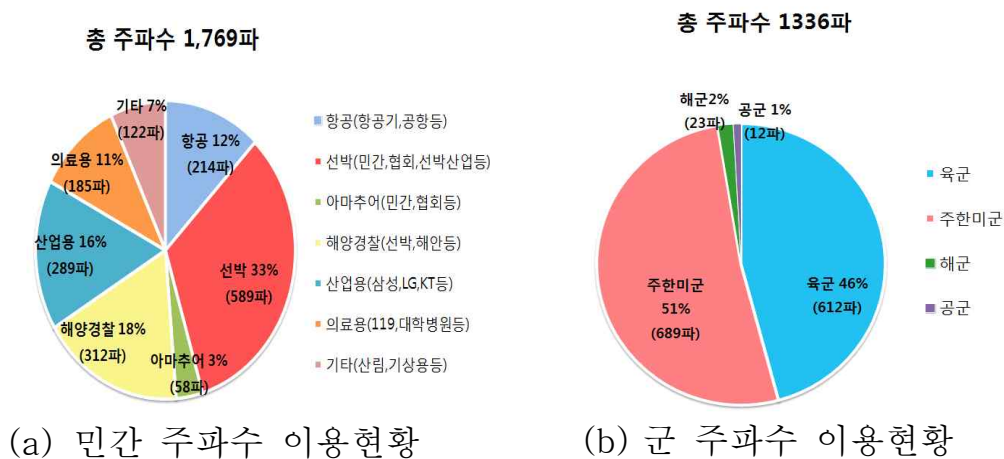


그림2-2 단파통신 주파수 이용현황

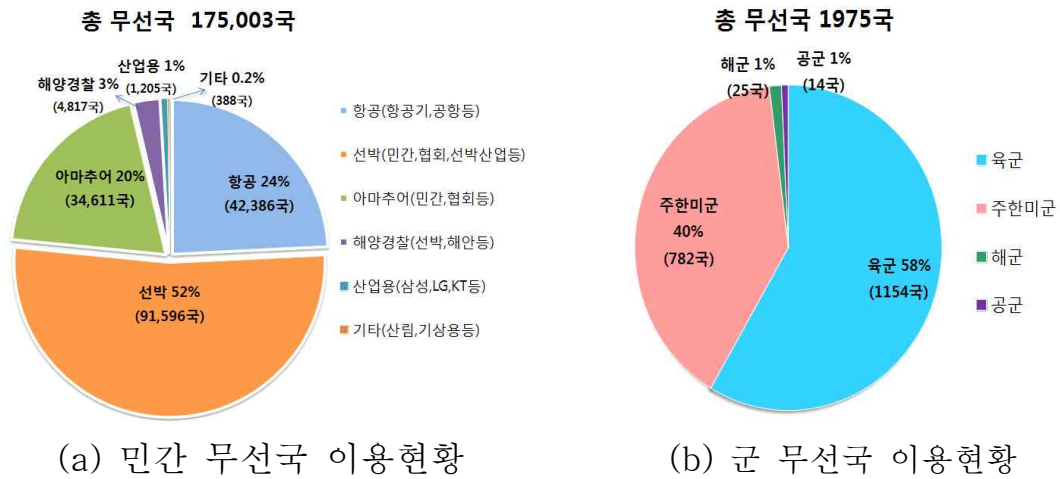


그림2-3 단파통신 무선국 이용현황

단파통신 주요 사용기관을 살펴보면, 수협은 해안국에서 어업선박(만천여척)에 날씨 등 정보제공을 위한 방송용(2시간간격)으로, 선박은 위치보고용(1일 1회)으로 사용하고 있으며, 해안통신국 방송용 및 선박위치보고용으로 2/4/8/27MHz 사용하고 있다. KBS는 당진, 화성, 김제 송신소를 통해 KBS월드라디오(11개 국어, 세계 각국) 및 한민족방송(한국어, 북한·중국·러시아)에 사용하고 있으며, 월드라디오 방송용으로 3/5/6/7/9/11/13/15MHz 사용하고 있다. 아마추어연맹은 개인 및 단체가 동남아 및 전 세계 통신을 위해 사용하며, 동남아 지역은 7MHz, 전세계는 14/21/24/28MHz 사용하고 있다. 해양경찰은 조난통신용으로 사용되거나 사용빈도가 매우 적으며, 조난통신용으로 2/4/6/8/16MHz 사용하고 있다. 육군은 부대간 정기교신(1일 3회) 및 훈련시 상시적으로 사용하며, 특히 특수부대 훈련시에는 필수 통신방식으로 사용하고 있으며, 군단급 이상은 2~8MHz, 군단급 이하는 9~30MHz 사용하고 있다. 공군은 먼 바다에서 해군이 전투기 출격을 요청하거나 유·무선통신망이 두절되는 비상시 사용하고 전투기 출격 요청 및 비상시 3/4/5/6/8/11/14/15/17/20MHz 사용하고 있다. 해군은 공군 전투기 출격을 요청하거나 함정/잠수함에서 교신을 위한 위성통신망이 두절되는 비상시 사용하고 있으며, 공군전투기 출격요청 및 위성통신망 두절시 3/4/5/6/7/22/25MHz 사용하고 있다. 표2-1는 단파통신 사용기관 현황을 보여주고 있다.

표2-1 단파통신 사용기관 현황

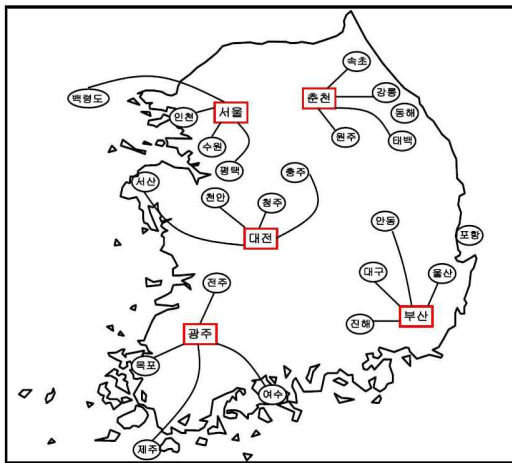
기관	사용처	용도	주요 사용주파수 (MHz)	DB상 허가 주파수 (MHz)
수협	해안기지국	어업방송 (날씨, 파고 등)	8	3/4/6/8/12/27 (28파)
	어업선박	위치보고	2/3/4/27	3~9/12/16~18/22/27 (446파)
KBS	방송 송신국	라디오 방송	3/5/6/7/9/11/13/15	3/5/6/7/9/11/13/15 (23파)
어마추어연맹	개인 무선국 단체 무선국	교신	7(동남아), 14/21/24/28(전세계)	3/4/7/8/10/14/18/21/ 24/27/28 (84파)
해양경찰	해안국 경비함정	조난	4/6/8/16	3/4/5~13/16/17/19/ 21/22/26/27/28 (292파)
육군	기지국 무전기	군단급이상	2~8	3~30 (1,538파)
		군단급이하	9~30	
공군	기지국	유무선 두절 먼 바다 작전	3~6/8/11/14/15/17/20	3~6/8/11/14/15/17/20 (15파)
해군	기지국 함정 잠수함	전투기 출격 요청 위성통신 두절	3/4/5/6/7/22/25	3/4/5/6/7/22/25 (23파)

### 제3절 단파통신 서비스 제공 현황 및 문제점

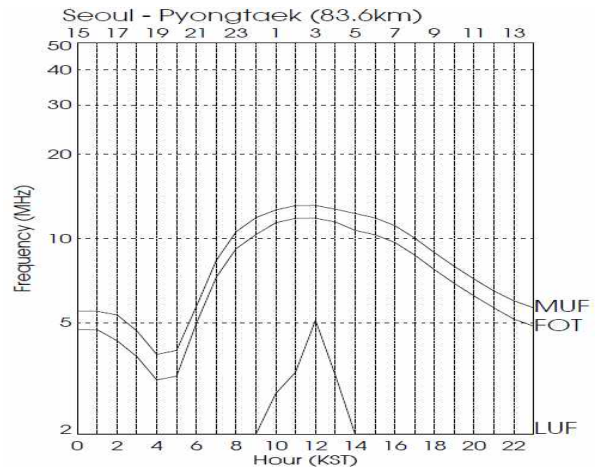
#### 1. 단파통신 서비스 제공 현황

우주전파센터에서는 VOACAP 프로그램을 이용하여 월간단파예보, 지점대 지점, 지점대 지역에 대해 단파통신 서비스를 제공하고 있다. 월간단파예보는 월단위의 국내외 주요지점별로 단파통신 주파수를 PDF파일로 발간하여 제공하고 있다.

그림2-4는 국내 주요지점간 서비스는 광역도시를 중심으로 인근 시단위의 지역에 대한 시간대별 MUF, FOT, LUF 그래프를 제공하고 있다. 또한 그림2-5는 국외지역에 대해서는 서울을 중심으로 세계 주요 36개 도시를 대상으로 MUF, FOT, LUF 그래프를 제공하고 있다.

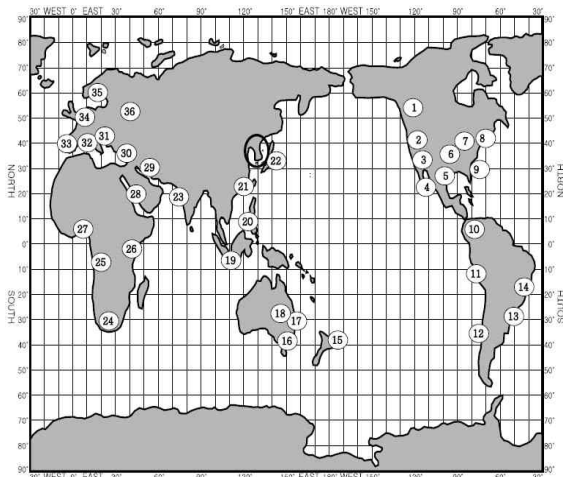


(a) 국내 주요지점

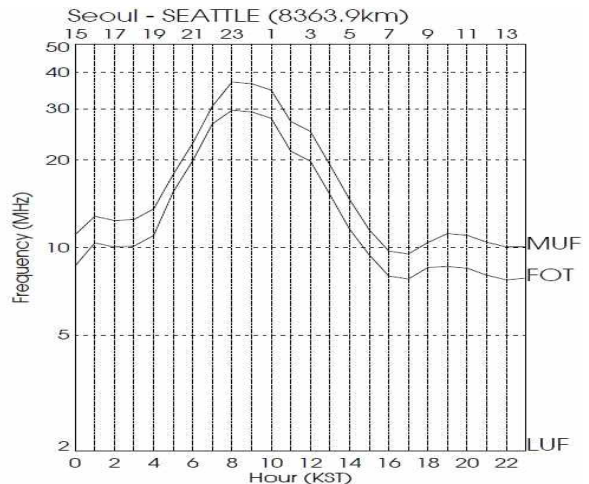


(b) 국내 지점 단파통신 주파수 산출 예

그림2-4 국내 주요지점간 월간예보



(a) 국외 주요지점



(b) 국외 지점 단파통신 주파수 산출 예

그림2-5 국외 주요지점간 월간예보



그림2-6은 지점대지점 단파통신 서비스는 홈페이지에서 송수신 지역, 사용 주파수, 출력, 안테나 종류 등을 입력하면 국내외 지역 간 MUF, FOT, LUF 그래프, S/N비, 통신가능시간, 월간주파수 계획표 등이 출력으로 산출된다.

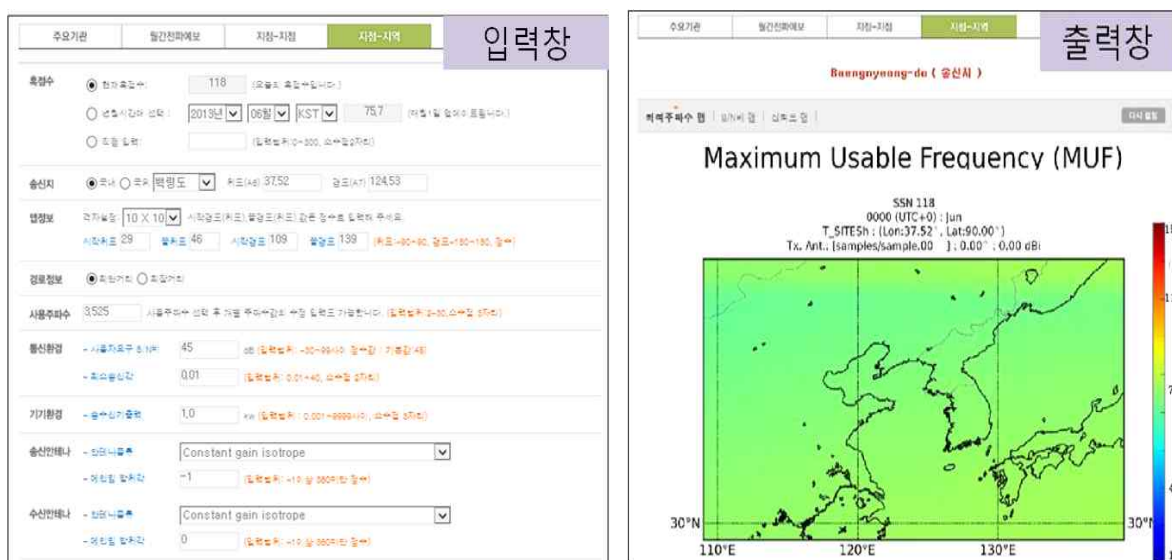


(a) 지점대지점 입력창

(b) 지점대지점 출력창

그림2-6 지점대지점 단파통신 서비스

그림2-7은 지점대지역 단파통신 서비스는 홈페이지에서 송신 지역, 사용 주파수, 출력, 안테나 종류 등을 사용자가 입력하면 MUF, S/N비, 신뢰도 등이 출력으로 산출된다.



(a) 지점대지역 입력창

(b) 지점대지역 출력창

그림2-7 지점대지역 단파통신 서비스

## 2. 단파통신 서비스 문제점

우주전파센터에서 제공 중인 VOACAP 모델을 통해 월간단파예보, 지점대지점, 지점대지역 서비스는 1개월 단위로 주파수를 산출하고 있다. 그러나 VOACAP 모델은 전리층 정보를 1개월간 평균 흑점개수만을 적용하므로 이에 따른 주파수가 1개월 간 동일하게 적용됨으로 실제 사용 할 수 있는 주파수와는 차이가 발생한다. 단파통신 주파수는 전리층 관측값을 기준으로 송수신 거리 및 출력을 고려하여 산출된다. 따라서 실제 단파통신을 원활하게 사용하기 위해서는 전리층 관측값을 실시간 적용하여 주파수를 산출하여야 한다.

현업에 이용되는 대부분의 모델은 장기간의 관측자료를 바탕으로 하는 경험적 모델이며, 모델의 출력 인자에 따라 주파수, 전리권 최대밀도, 전리층 최대밀도 고도 등을 산출하고 있다. 그러나 전리층의 상태를 3차원으로 감시할 수 있는 역학적 모델은 전 세계적으로 아직 개발되어 있지 않은 상황이다. 전리층의 예측을 위하여 사용되는 모델은 크게 경험적 모델과 역학적 모델이 있지만 현재까지 전리층의 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 전리층 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 전리층 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 전리층의 물리적 혹은 경험적 모델의 제한조건과 결합시켜 성능을 개선할 수 있는가이며, 둘째로 자료 동화 기법이 적용될 양질의 전리층의



관측자료를 확보 가공할 수 있는가의 문제이다. 따라서 전리층 자료 동화 모델 개발에서 핵심이 되는 문제 중의 하나는 바로 현재 전리층의 정보를 어떤 장비로 얼마나 정확하게 관측할 수 있는 것이 관건이다. 이러한 의미에서 전리층 관측기의 추가설치와 관련하여 만약 추가로 관측되는 전리층의 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. 그림2-8은 39개 전 세계 관측소의 Ionosonde 관측자료를 이용하여 동화자료 모델을 개발하였는데 이는 기존의 월간 평균값을 모델 결과와는 달리 실시간으로 전리층의 관측자료를 동화처리 함으로써 더욱 정밀도 높은 모델 결과를 보여주고 있다.

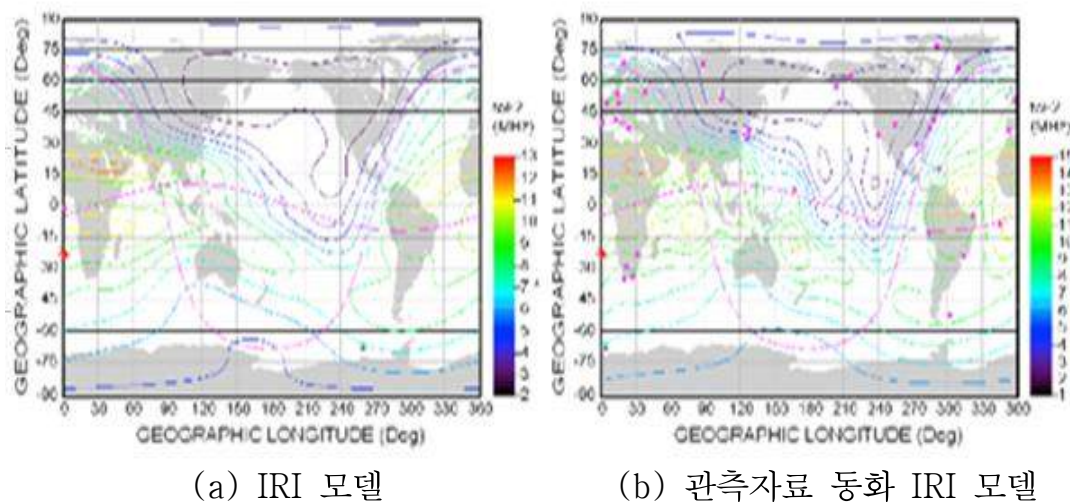


그림2-8 Ionosonde 관측자료를 이용한 IRI 모델

따라서 현재 한반도에서 운용하고 있는 이온존데의 관측 성능을 개선하고 신뢰도 높은 관측 결과를 도출함으로써 향후 한반도의 지역 전리층 모델 개발 뿐 만아니라 전 세계 관측자료를 결합하여 관측자료 동화 모델을 개발하여야 한다. 따라서 전리층 관측자료 동화 모델 개발을 통해 한반도 전역에 대한 전리층을 이용한 단파통신을 위한 최적주파수를 실시간 제공할 수 있을 것이다.

## 제3장 국내 전리층 관측자료 분석

### 제1절 전리층 개념

전리층(ionosphere)은 고도 50km부터 1000km에 형성된 층으로 태양으로부터 오는 자외선, 극자외선 및 X선 등이 자기력선을 따라 지구로 유입되어 지구 중성대기가 이온화되어 플라즈마 상태로 존재하는 영역이다. 전리층은 크게 D, E, F1, F2 층으로 분류되며 “층(layer)”은 고도에 따라 전리층의 전자밀도가 밀집한 곳이 존재함을 의미한다. 그림3-1는 전리층을 D~F층으로 분류 되는 것 과 그리고 주간과 야간의 차이를 보여주고 있다.

#### 1. D층

D층은 대체로 50~90km의 범위에 걸쳐 있는데, 주로 음이온으로 구성되어 있다. D층의 전자밀도는 매우 낮기 때문에 통과하는 전파에 크게 영향을 미치지 않는다. 그러나 태양의 활동이 증가하면 다른 층과 마찬가지로 D층의 전자밀도가 급격히 증가하여 전파가 E층이나 F층에 도달하기 전에 D층에서 반사되어 목표로 하는 수신점에 도달되지 않게 된다. 또한 전파가 전리층을 통과할 때 전자들은 전파의 전기장에 의해서 진동하게 된다. E층이나 F층에는 중성대기의 밀도가 낮기 때문에 전자는 진동하는 중에 공기분자와 거의 충돌하지 않는다. 그러나 D층은 대기밀도가 높아 쉽게 충돌하므로 전파 에너지를 소모시켜 신호 감쇠를 일으키게 된다.

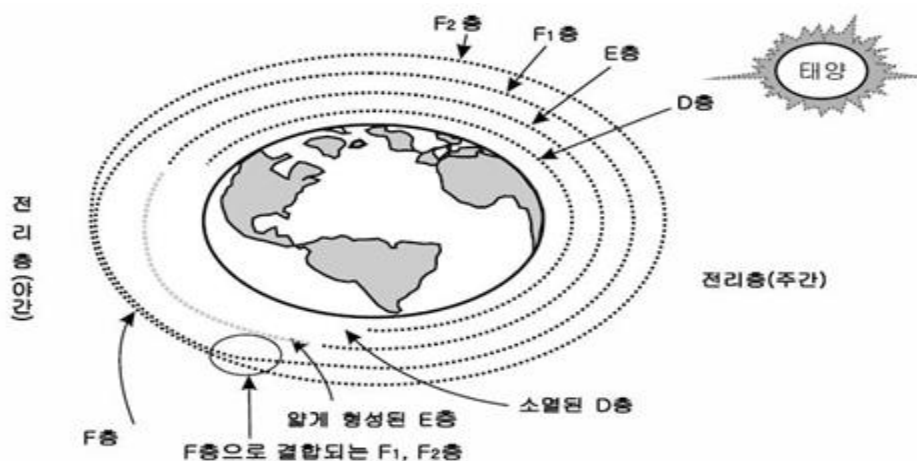


그림3-1 전리층 구성

## 2. E층

E층은 고도 90~160km 범위의 전리층으로 장파 이하 주파수를 가지는 전파만 반사하고 단파 이상의 주파수는 흡수 또는 통과시킨다. E층의 수직구조는 이온화와 재결합의 정도에 따라 결정되는데 일몰이후 점차적으로 사라지게 된다.

## 3. 스포라딕 E층(Es)

스포츠라딕 E층은 E층과 비슷한 높이인 100km 부근에서 불규칙적으로 발생하는 전리층으로 전자밀도가 E층보다 높은 경우가 많으나 두께는 수km로 얇게 형성된다. 전파를 완전히 반사하는 경우와 부분적으로 반사하는 경우가 발생하는 등 반사형태가 확실히 밝혀지지 않았다.

스포츠라딕 E층은 지극히 국지적이며 위도별로 그 형태가 다르고 시간적 변화 상황도 달라 언제 어떻게 발생되며 사라지는지 아직 밝혀지지 않았다. 그러나 초단파의 경우 스포라딕 E층으로 인해 전파가 반사됨으로써 원거리에 전파되어 전파혼신을 야기하게 된다.

## 4. F층

160km 이상의 고도에서 형성되는 전리층으로 자유전자 밀도가 가장 높게 형성된 층으로 주로 단파대를 반사시키게 된다. 낮 시간동안에는 F층이 F1층과 F2층으로 나뉘게 되고 밤 시간이 되면 F1층과 F2층이 결합하게 된다.

# 제2절 전리층 관측기 운용현황

국립전파연구원은 1973년부터 전리층 관측기(DIGISONDE)를 이용하여 전리층을 관측하였다. 1973년~2009년까지는 안양에서 관측하였고 청사이전으로 인해 2010년부터 현재까지 이천에서 관측하고 있다. 또한 2009년부터 제주에 추가로 설치하여 현재까지 관측하고 있다. 그림3-2은 관측기 운용현황과 표는 관측데이터 보유현황을 나타낸다.

국립전파연구원에서 관측하고 있는 그림3-3전리층 관측기(DIGISONDE)는 미국 로웰대학에서 개발된 것으로 세계적으로 가장 널리 쓰이는 전리층 관측기이다. DIGISONDE 관측기는 수직으로 전파를 송신 및 수신하여 전리층의 이온 밀도를 관측하는 원리로 기본적으로 레이더 기술을 이용한다.



관측지점	관측기간	비고
안양	1973~2009	-
이천	2010 ~ 현재	2010년 안양에서 이천으로 이전
제주	2009 ~ 현재	2009년 신규설치

그림3-2 전국 관측기 운용현황

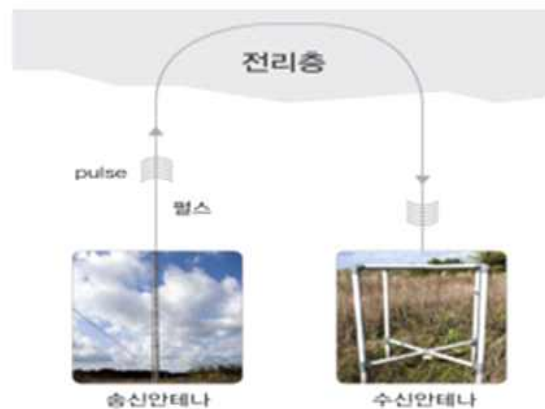


그림3-3 전리층 관측기

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.

3~30MHz의 주파수를 스캔하여 차례로 송신하고 이에 따른 수신 전파를 분석하여 가상고도에 따른 플라즈마 밀도를 계산하며 모형 계산을 통해 가상고도에 해당하는 내용을 실제 고도로 변환한다. 이러한 변환작업을 통해 DIGISONDE 관측기는 최대밀도와 고도 NmF2, HmF2를 생성하며, 이 물리량은 DIGISONDE 관측기의 대표적인 물리량으로서 지역적인 전리층의 변화량의 기후학적 분석을 하는데 이용된다. DIGISONDE 관측기는 관측 소프트웨어로

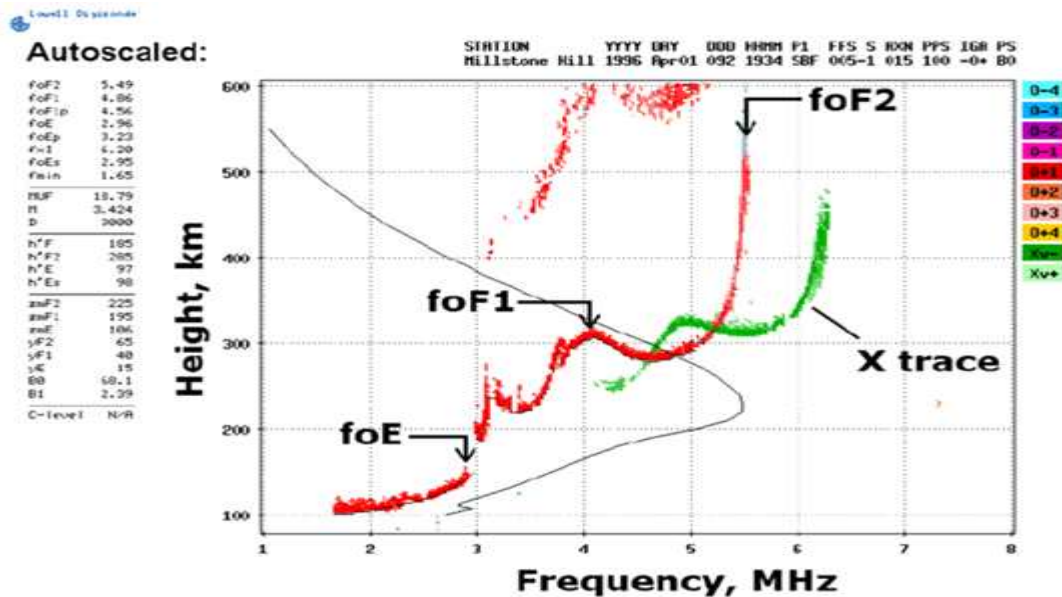


그림3-4 이오노그램

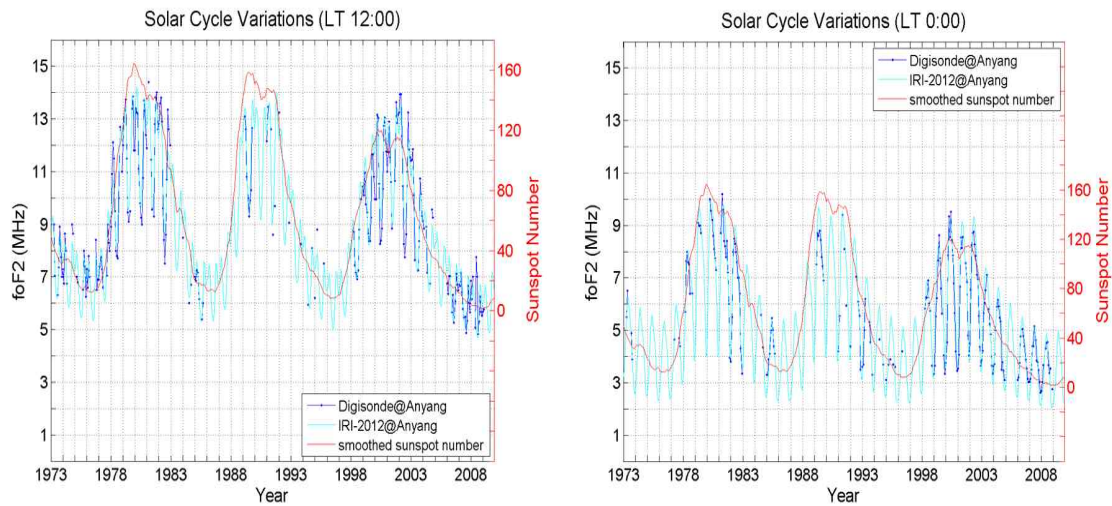
이오노그램을 사용한다. 이오노그램은 이오노존데에서 발사한 전파의 주파수에 따른 도달시간을 그래프로 나타낸 것이다. 하지만 실제로는 특정한 층에서 반사되어 되돌아오는데 걸리는 시간이 결국 반사된 고도를 나타내는 것이므로 이오노그램을 보면 가로축이 주파수(MHz), 세로축이 고도(km)로 나타나는 경우가 많다. 그림3-4은 이오노존데에서 생성된 이오노그램예를 나타낸 것이다.

### 제3절 국내 전리층 관측자료 분석

#### 1. 국내 전리층 장기 변화 특성 분석

국내 전리층에 대한 장기 분석을 위해 안양에서 1973~2009 년(36 년)간 자료를 흑점수 및 국제표준 전리층 모델(IRI-2012)과 비교 분석하였다. 분석결과, 태양활동 극대기 일수록 관측값이 높게 형성되고 극소기 일수록 관측값은 낮게 형성되었다. 그림 3-5 (a)는 12 시 관측자료 (b)는 0 시 관측자료를 참조하여 낮시간대가 밤시간대에 비해 주파수가 높게 형성되었으며 주파수대역은 2~15 MHz사이에서 형성되고 있다.





(a) 12시 관측자료

(b) 0시 관측자료

그림3-5 국내 전리층 장기 변화 분석

## 2. 국내 전리층 단기 변화 특성 분석

그림3-6은 2012년 이천과 제주 관측자료를 시간대별 평균값으로 월별 분석하였다. X축은 시간이고 Y축은 F2층 임계주파수(Fof2)이다. 분석결과, 전반적으로 우리나라가 태양을 정면으로 바라볼 때인 정오부근에서 가장 높은 주파수를 형성하고 일몰이 지나면 급격히 주파수가 낮아지는 특성을 보였다. 그리고 봄철(3~4월)과 가을(10~11월)에 가장 높은 주파수를 형성하였으며, 여름(7~8월)에 가장 낮은 주파수를 나타내고 있다. 또한 봄과 가을은 낮과 밤의 주파수 변화 차이가 컸으나 여름에는 낮과 밤의 차이가 거의 나지 않았다. 또한 이천보다 제주 관측값이 높게 형성되었다.

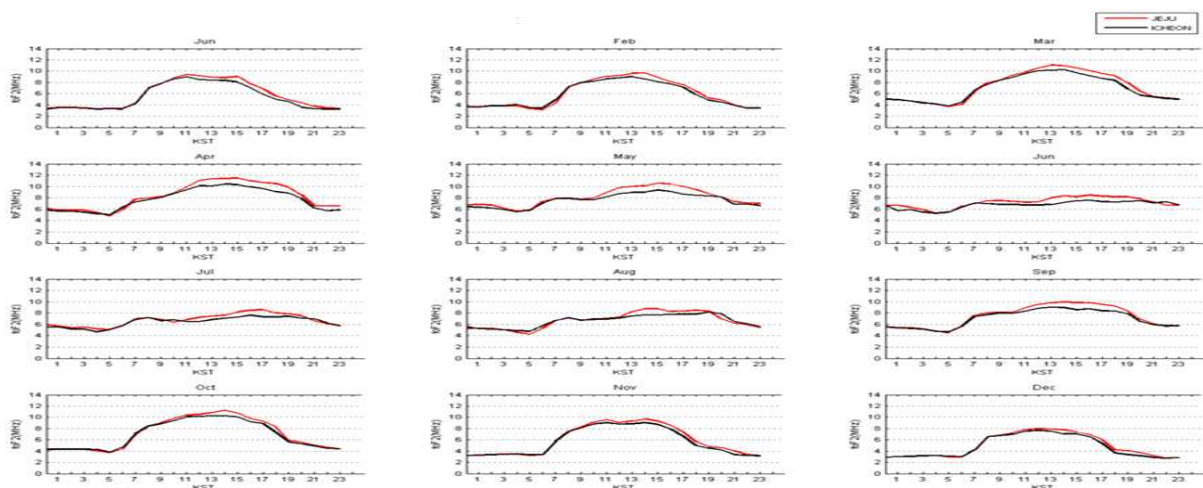
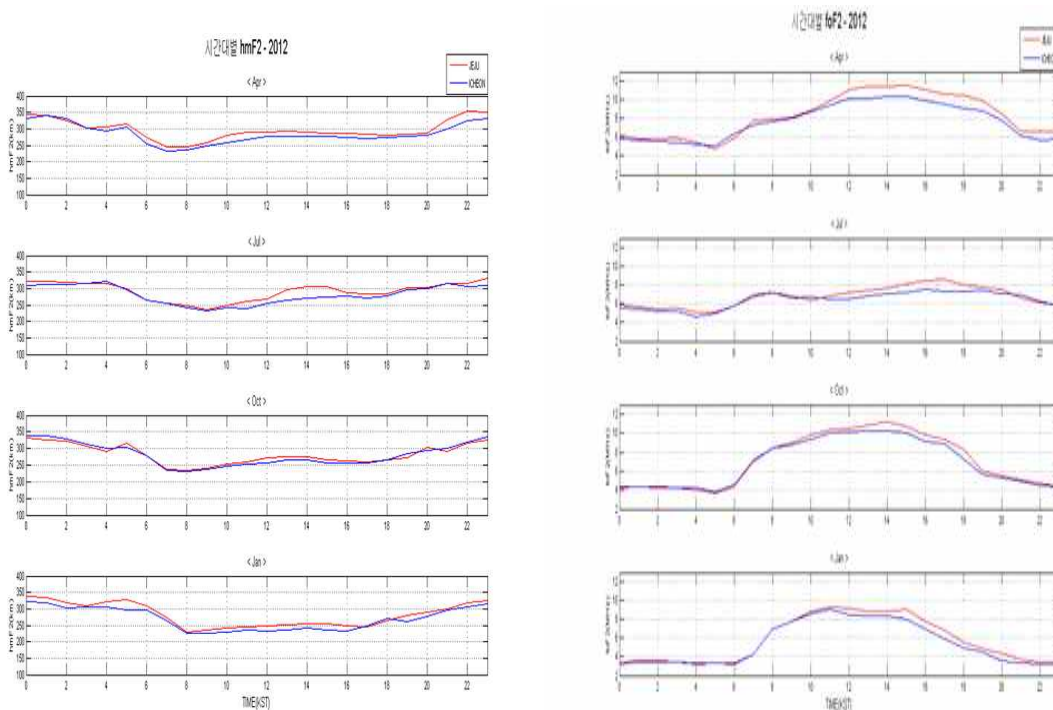


그림3-6 이천,제주 관측자료 월별 분석

좀더 자세히 분석하기 위해 계절별로 전리층 임계주파수와 전리층 높이를 분석하였다. 2012년 봄(4월), 여름(7월), 가을(10월), 겨울(1월)에서 foF2와 hmF2의 이천 및 제주 관측값을 비교 분석하였다.

그림 3-7 (a)는 먼저 hmF2 비교결과를 나타내며, 봄과 가을에서는 hmF2 가 약 200~350km, 여름은 약 200~330km, 겨울에는 약 200~340km 에서 전리층 높이를 형성하고 있었으며, 제주가 이천보다 약간 더 높게 형성됨을 알 수 있었다.

그림 3-7(b)는 foF2 를 비교결과를 나타내며, 봄과 가을은 약 3~12MHz 를 분포하였고 낮과 밤에 대한 주파수 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 여름은 약 4~9MHz 가 형성되었고 낮과 밤에 대한 주파수 변화가 거의 없이 일정하게 나타났다. 또한 겨울에는 약 2~9MHz 가 분포하였고 낮과 밤에 대한 주파수 변화는 봄가을 보다는 작지만 어느정도 나타났으며 전반적으로 제주가 이천보다 foF2 값이 크게 형성됨을 알 수 있었다.



(a) 계절별 hmF2 분석

(b) 계절별 foF2 분석

그림 3-7 계절별 이천,제주 hmF2 및 foF2 분석



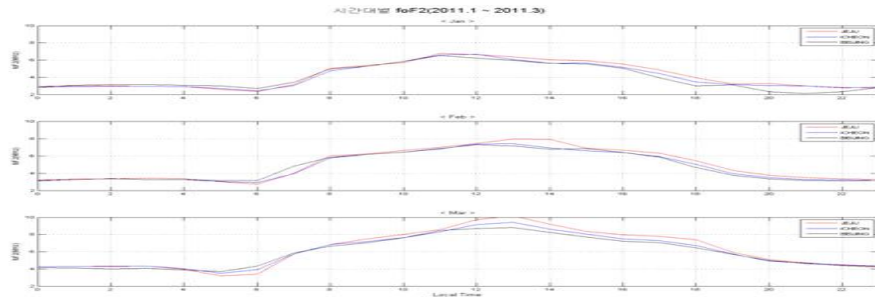
그림 3-8 DIGISONDE 관측기 위도별 위치

분석결과에서 보듯이  $hmF2$  와  $foF2$  의 관측값은 제주가 이천보다 높게 형성됨을 알 수 있다. 이는 위도가 낮을수록 태양의 영향을 많이 받기 때문에 전자밀도 높게 형성되기 때문이다. 이를 증명하기 위해 우리나라 주변의 위도에서 위도가 낮은 지역의 관측값과 비교하였다. 그림 3-8 에서처럼 동일한 관측기(DIGISONDE)를 사용하고 있는 중국의 베이징과 우한과 관측값을 제주와 이천 관측값과 비교 분석하였다. 지자기 위도로 베이징은  $N30.22^\circ$ , 이천은  $N27.5^\circ$ , 제주는  $N23.74^\circ$ , 우한은  $N20.41^\circ$ 이다. 베이징-이천-제주-우한 순으로 위도는 약  $3^\circ$  차이가 있다. 그러나 동일한 시간대 4개 지역 관측값이 존재하지 않아 베이징-이천-제주는 2011년 1월~3월 관측값, 이천-제주-우한은 2010년 5월의  $foF2$  값을 비교 분석하였다.

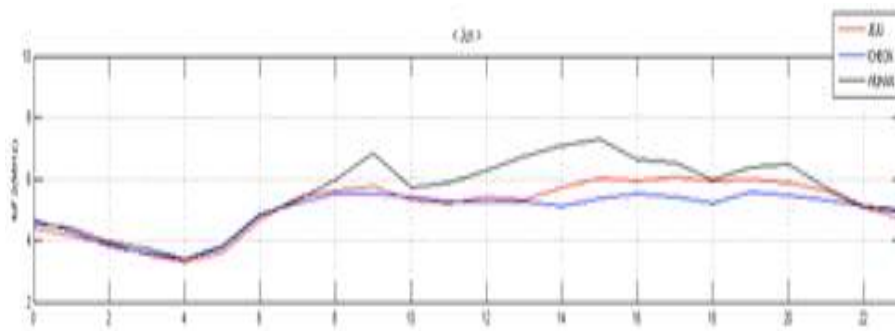
먼저 베이징-이천-제주 관측값 비교 분석결과, 그림 3-9(a)와 같이 위도가 가장 낮은 제주가 가장 높고 다음은 이천 그리고 베이징이 가장 낮게  $foF2$  값이 형성되었다. 그림 3-9(b) 또한 이천-제주-우한 관측값 비교 분석결과, 그림과 같이 위도가 가장 낮은 우한이 가장 높고 다음은 제주 그리고 이천이 가장 낮게  $foF2$  값이 형성되었다.

따라서 분석결과에 따라 위도가 낮을수록 태양활동에 영향을 많이 받아 전자밀도가 높아져  $foF2$  가 높게 형성됨을 알 수 있다.





(a) 제주,이천,베이징 foF2 비교



(b) 제주,이천,우한 foF2 비교

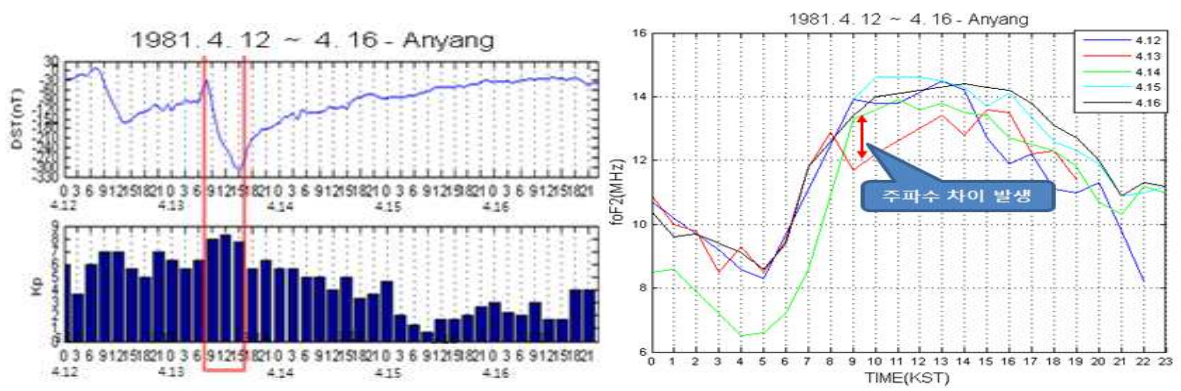
그림 3-9 위도별 foF2 비교분석

### 3. 지자기 변화에 따른 전리층 변화 분석

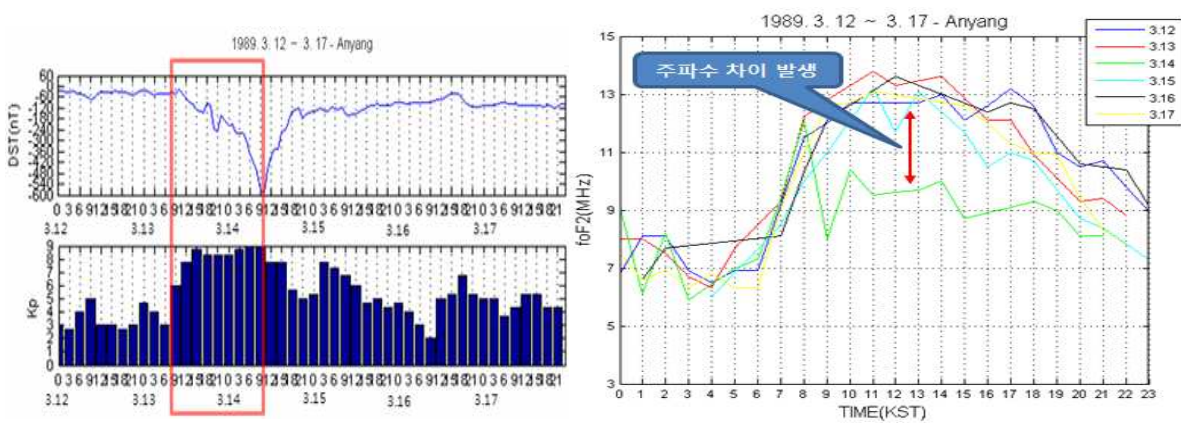
통상 DST가 급격하게 떨어질 때 지자기 교란으로 판단하는데 1981년 4월 13일 오전 8시경 DST가 약 -300nT로 급격히 떨어지면서 Kp가 8단계가 되었으며, 오후 3시경부터 회복기에 접어들었다. 이때 안양에서 측정한 foF2 값을 분석한 결과, 지자기 교란 시점인 오전 8시부터 평상시 주파수보다 약 2MHz정도 낮게 측정되었고 그 현상은 약 2~3시간 지속되었다.

그리고 1989년 3월 13일 8시경부터 DST가 24시간동안 점진적으로 떨어져 약 -600nT까지 하강하면서 Kp지수가 6에서 9까지 올라가 지자기 교란을 일으켰다. 이때 안양 FoF2 관측값은 10시간동안 평상시보다 약 4MHz 낮게 측정되었다.

그림 3-10 (a)와(b)처럼 지자기 교란에 의한 전리층 변화 분석결과, 지자기 교란 발생원인인 DST 크기가 크고 지속시간이 길수록 전리층 전자밀도 변화가 커져 반사되는 주파수 변화가 심화됨을 알 수 있었다.



(a) 1981 년 4 월 지자기 교란시 foF2 분석



(b) 1989 년 3 월 지자기 교란시 foF2 분석

그림 3-10 지자기 교란시 foF2 분석

## 제4장 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 분석 및 개선

### 제1절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 특성 및 파라미터 분석

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 발전하고 있으며, 현재 IRI-2012 모델까지 개발되었다.

IRI 모델은 특정 위치, 시간, 날짜에 따라 월 평균된 전리층 환경과 관련된 값들을 50 km에서 1,500 km까지의 고도 범위로 제공하며 세계 50여개 관측 자료를 기반으로 전자밀도 수직분포를 전리층 내의 각 영역별로 다양한 함수를 사용하여 표현한 경험모델이다.

IRI 모델은 전리층을 상층부(Topside), F2층, F1층, 중간부, E-Valley, E/D층으로 구분하여 전자밀도, 이온구성, 전자온도, 이온온도 등에 대해 월 평균값을 산출하고 지정된 지점과 시각에 대한 수직전자밀도분포 제공한다. 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.

#### 1. IRI 모델 입출력 파라미터

IRI 모델의 입력 파라미터는 F2, FM3, 지자기 위도, 산출 대상 지점의 위도, 경도 및 날짜, 시각, 월평균 태양 전파 플럭스(파장 10.7cm), 태양의 적위 및 천정거리, 태양 흑점 수 R12, 일출 및 일몰 시각 등이 있으며, 출력 파라미터로는 전리층 각 영역에서의 최대 전자밀도, 최대 전자밀도를 갖는 고도 및 해당 고도에서의 주파수, 고도에 따른 전자밀도 분포도이며 그림 4-1은 IRI 모델의 입출력 정보를 나타내었다.



그림4-1 IRI 모델의 입출력 정보

## 2. IRI 모델 코드 구조 및 구동방식

그림4-2는 IRI-2012 모델 코드 구조 및 관계도를 나타내고 있으며, 총 9개의 코드로 구성되어 상호 연결고리를 가지고 있다.

- ▷ IRITEST.for : 주 실행코드이며 나머지 코드들이 서브루틴 제공한다.
- ▷ IRISUB.for : 주 서브루틴인 IRI\_SUB 및 IRI\_WEB 포함
  - IRI\_SUB : 지정된 위치, 날짜, 시각, 고도 범위에 대해 IRI 파라미터 계산
  - IRI\_WEB : 지정된 위치, 날짜, 시각 및 특정 변수 범위에 대해 IRI 파라미터 계산(변수 범위는 고도, 위도, 경도, 년, 월, 일, 시각에 대해 설정)
- ▷ IRIORBIT.for : 특정 궤도를 따라 IRI 파라미터 계산
- ▷ IGRF.for : IRI 모델에 필요한 IGRF 파라미터 계산
- ▷ IRITEC.for : TEC(Total Electron Content) 계산
- ▷ IRIFUN.for : IRI 모델에 필요한 함수와 각종 서브루틴 제공
- ▷ IRIDREG.for : D층 모델 제공
- ▷ FLIPIRI.for : 하층부 B0, B1, Ni 모델, 지자기폭풍 모델 등 제공
- ▷ CIRA.for : 중성 온도 및 밀도 모델 제공

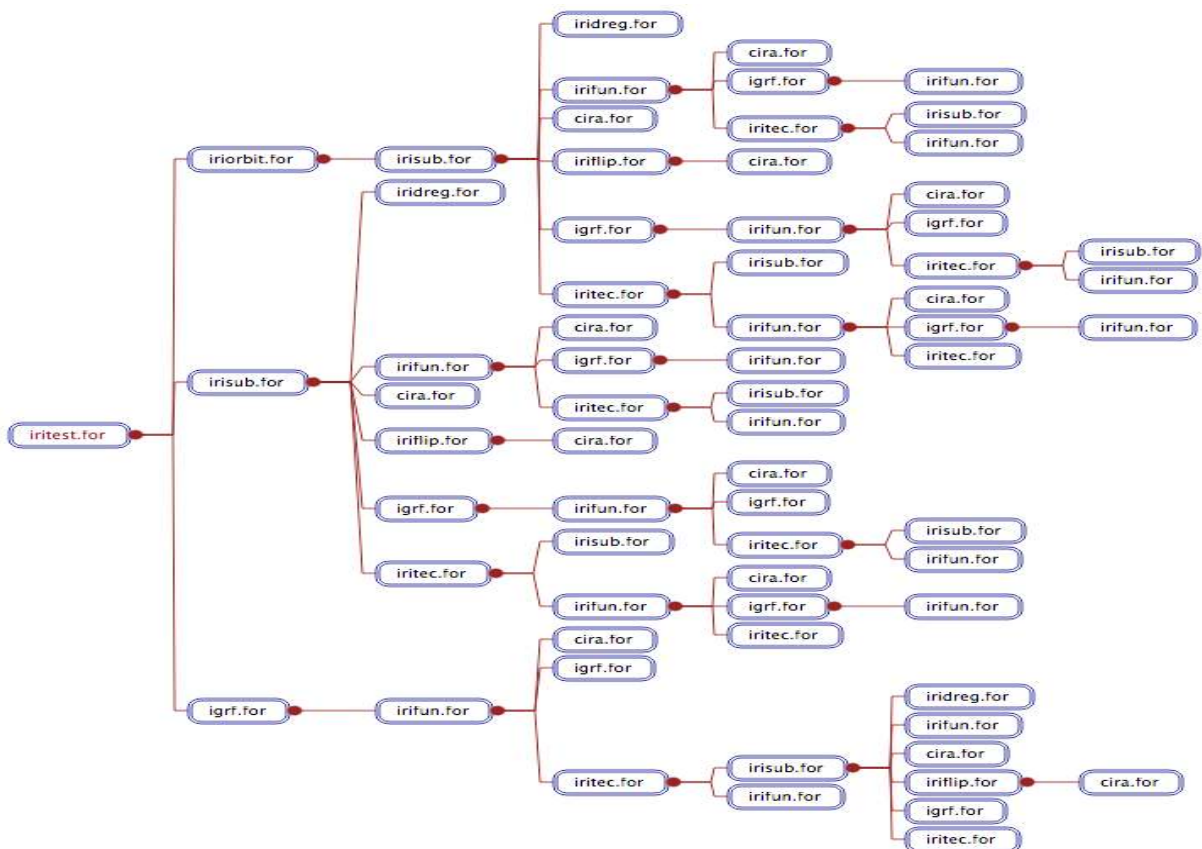


그림4-2 IRI-2012 모델의 코드 구조 및 관계도



IRI-2012 모델은 1단계로 CCIR/URSI로부터 구면 조화함수와 푸리에시리즈 계수로 제공되는 F2와 FM3 계수값을 사용하여 foF2와 M3000(F2)의 월 중간값 산출한다. 2단계로는 산출된 foF2 월 중간값으로부터 지정된 시각에 대해 zfoF2 추정하고 인접한 달의 zfoF2(각 월의 15일에 해당하는 값)를 이용해 날짜 차이에 대해 보간하여 foF2n 산출한다. 그리고 3단계로 산출된 foF2n에 지자기폭풍 보정계수(storm correction factor) cf를 적용하여 foF2의 최종 산출물 foF2s 계산하게 된다.

## 제2절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 예측값과 관측값 비교 분석

그림4-3과 그림4-4은 2012년 1월~ 2012년 12월 월별 이천 및 제주 관측값과 IRI-2012 모델 예측값을 비교하여 도시하였다. 비교 결과, 전반적으로 IRI-2012 모델 예측값이 관측값보다 높게 형성하였으며, 특히 겨울철인 11월, 12월, 1월, 2월에 관측값과 차이가 크게 나타났다.

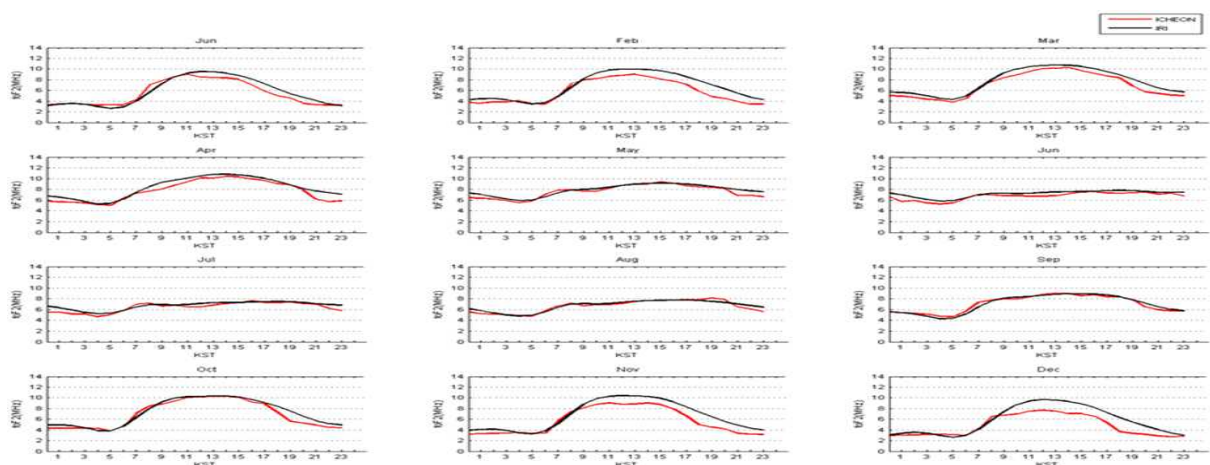


그림4-3 이천 관측값과 IRI-2012 예측값 비교(2012.1월~2012.12월)

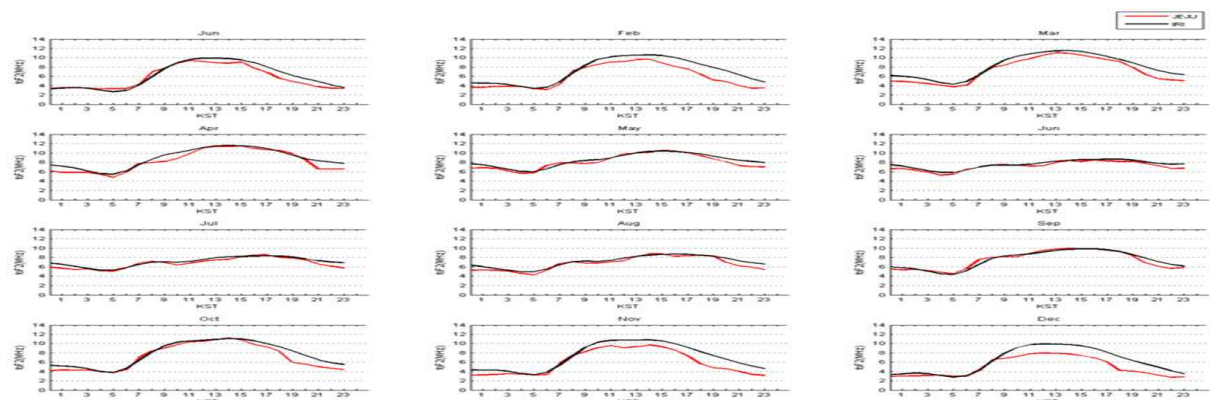
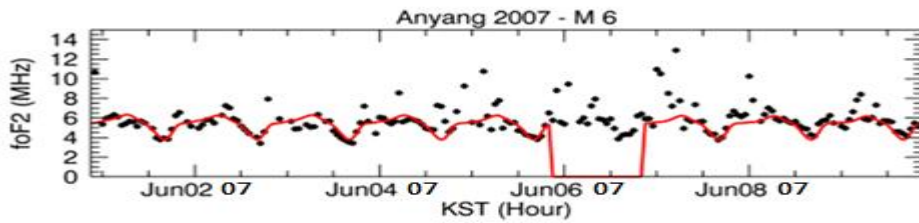
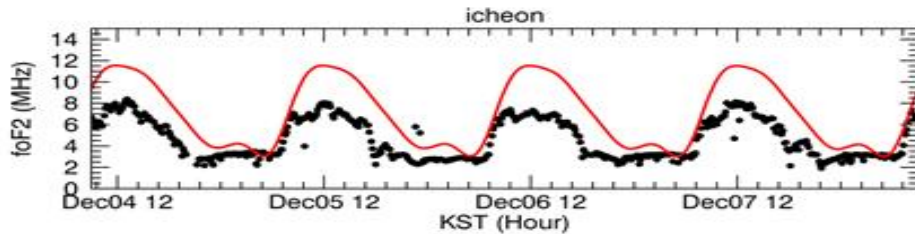


그림4-4 제주 관측값과 IRI-2012 예측값 비교(2012.1월~2012.12월)



(a) 안양 관측값과 IRI-2012 비교



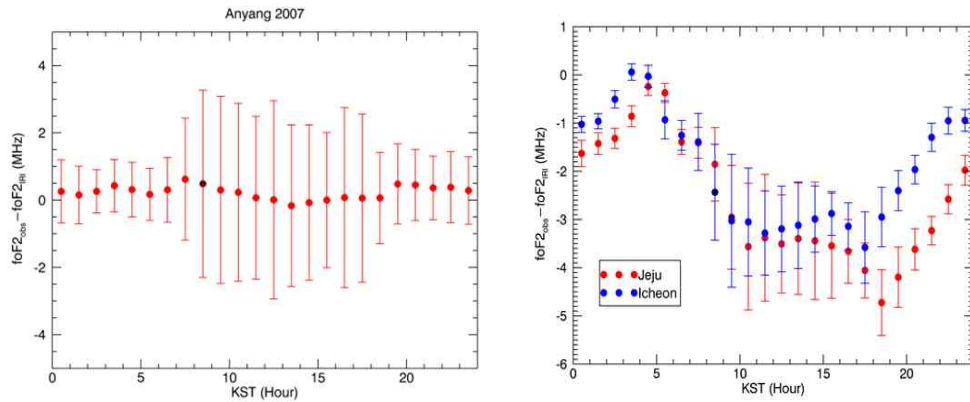
(b) 이천 관측값과 IRI-2012 비교

그림4-5 안양/이천 관측값과 IRI-2012 비교

보다 자세히 비교하기 위해 일자별로 IRI-2012 모델 예측값과 관측값을 비교하였다. 먼저 그림4-5의 (a)에서처럼 여름철인 2007년 6월 1일 ~ 6월 9일간 안양 관측값과 IRI-2012 모델 예측값을 비교하였고 그림4-5의 (b)와 같이 겨울철인 2012년 12월 4일 ~ 12월 8일간 이천 관측값과 IRI-2012 모델 예측값을 비교하였다.

안양 관측값과 IRI-2012 예측값 비교 결과, 관측값과 IRI 예측값은 비교적 잘 맞는 편이나 관측값이 산발적으로 나타났다. 이는 여름철 Sporadic-E층이 산발적으로 발생됨에 따라 나타난 현상으로 분석된다. 또한 이천/제주 관측값의 비교 결과는 IRI 예측값이 관측값보다 일정하게 크게 나타나며, 특히 우리나라가 태양과 정면일 때인 정오(12시) 부근에서 가장 큰 차이를 보이고 있다.

또한 그림4-6에서는 관측값에서 IRI 예측값을 뺀 값으로 관측값과 IRI 예측값 차이를 하루 중 시간에 따라 분석한 결과로 그 차이가 낮 시간에 더욱 커지며 결과의 분산도 함께 커짐을 알 수 있다. 이는 태양활동이 활발할수록 IRI 모델의 오차가 커짐을 알 수 있다. 따라서 실제 전리층 상태를 실시간 도출하기 위해서는 IRI모델이 실시간 관측값을 적용하도록 개선되어야 한다. 한편, 이천과 제주 관측값은 상호 큰 차이가 없으므로 우리나라 지역의 공간 규모가 상대적으로 크지 않음을 시사하며, 따라서 이천 및 제주의 2개 관측소를 기반으로 한 국지적 동화모델을 통한 실시간 전리층 상태 파악이 가능할 것이다.



(a) 안양값측값 - IRI 비교      (b)이천/제주관측값 - IRI 비교

그림4-6 관측값과 IRI-2012 비교분석

### 제3절 국제표준 전리층 모델(IRI-2012) 개선 및 검증

#### 1. IRI 동화모델 개발 동향

전리층 관측자료를 기반으로 한 IRI 동화모델은 유효태양활동지수 기반 동화모델 기법, GPS 자료 동화 기법, 모델 변형 동화 기법 등이 있다.

##### 가. 유효태양활동지수 기반 동화모델 기법

유효태양활동지수 기반 동화모델 기법은 미국 NASA GSFC(Goddard Space Flight Center)와 이탈리아 INGV 및 영국 RAL가 공동으로 개발한 기법이 있다. 미국 NASA GSFC에서 개발한 기법은 지자기활동 지수 IG12를 이용한 foF2 자료 동화모델이다. 70여개 이오노존데에서 수집된 foF2 측정 자료를 이용한 동화기법으로 Geosat 위성의 단일주파수 기반 고도 측정자료의 전리층 영향 보정에도 활용되고 있다. 또한 이탈리아 INGV 및 영국 RAL가 공동으로 개발한 기법은 IRI 모델과 SIRMUP 모델을 연계한 3차원 모델 기법이다. 태양활동 지수 R12를 이용한 foF2, M(3000)F2, 전자밀도프로파일 자료 동화한 것으로 이탈리아 지역 2개 이오노존데 자료를 이용한 국지적 동화모델 유효태양활동지수를 기반으로 하는 동화모델은Auto-scaling 에러의 영향을 적게 받으며 국지적 동화모델에 적합한 것으로 알려져 있다. 그림4-7은 유효태양활동지수 기반 동화모델의 동화자료 관측지점이며, 그림 4-8은 유효태양활동지수 기반 동화모델의 foF2 분석결과이다.

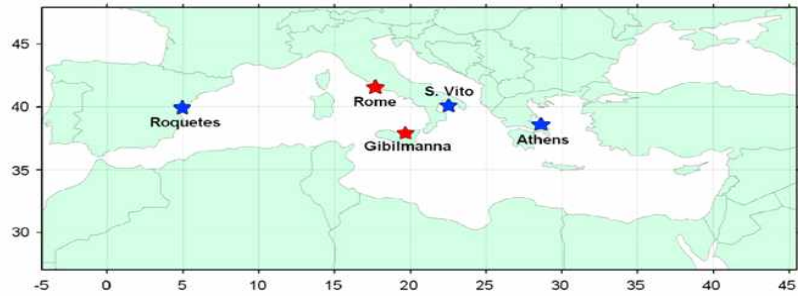


그림4-7 유효태양활동지수 기반 동화모델의 동화자료 관측지점

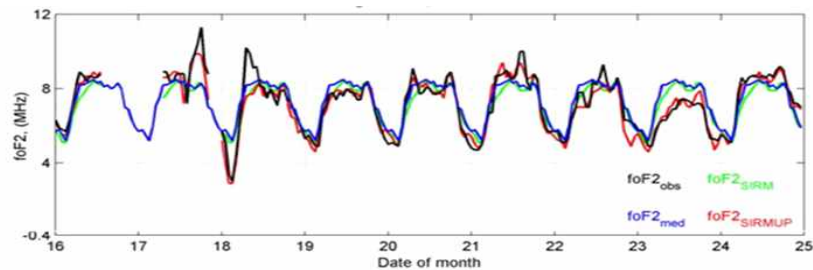


그림4-8 유효태양활동지수 기반 동화모델의 foF2 분석결과

#### 나. GPS 자료 이용 동화 기법

GPS 자료 이용 동화 기법으로는 캐나다 New Brunswick 대학에서 GPS 기반 TEC(Total Electron Content) 자료를 이용한 동화기법으로 Geosat Follow-On, ERS(European Remote Sensing) 위성 등의 단일 주파수 기반 해양 표고 측정 자료의 보정에 활용되고 있다.

#### 다. 모델변형 동화 기법

미국 Massachusetts Lowell 대학에서 개발된 기법으로 모핑(Morphing) 기법 기반의 IRI-RTAM(Real-Time Assimilative Mapping) 방식이다. IRI-RTAM 기법은 GIRO(Global Ionospheric Radio Observatory)의 전세계 42개 이오노존데 관측소의 측정 자료 이용하여 관측지점별 diurnal expansion의 변형 그림4-9과 미관측 지점에 대한 신경망최적화 보간법그림4-10을 통한 전지구적 동화 기법으로 소규모 지역의 동화 목적으로는 미관측 지점에 대한 보간이 불필요하므로 효율이 떨어지는 단점이 있다. 표4-1은 관측자료 동화 기법 비교표이다.



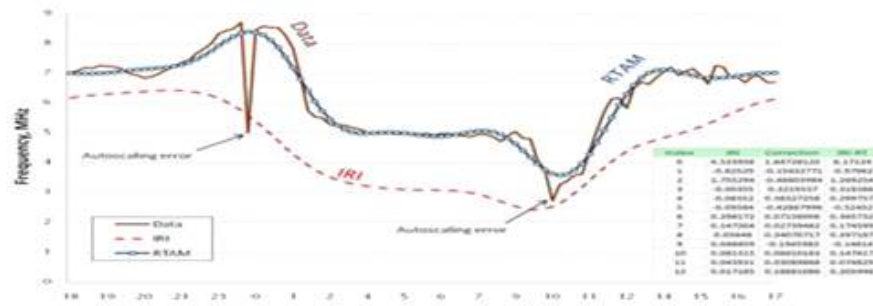


그림4-9 IRI - RTAM 기법

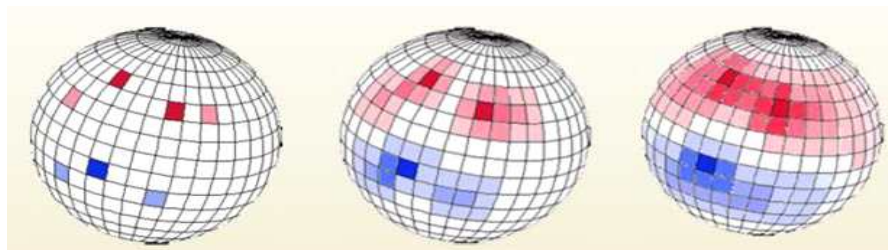


그림4-10 IRI-RTAM의 미 관측지점 보간법

표4-1 관측자료 동화 기법 비교표

동화모델	Bilitza et al. (1997)	IRI-SIRMUP	IRI-RTAM
동화 방식	Effective Solar Index (IG12 이용)	Effective Solar Index (R12 이용)	foF2 map morphing
적용 범위	전 지구	유럽 일부 지역	전 지구
동화 자료	foF2 자료 (70여 개 이오노존데)	foF2, M(3000)F2 자료 (2개 이오노존데)	foF2 자료 (40여 개 이오노존데)
검증 여부	자체 검증 수행	3개의 주변 관측소 자료를 이용한 비교 검증 수행	검증 안 됨 (개발 중임)
본 연구와의 적합성	단파통신 예보에 핵심적 인 foF2의 예측 결과를 좌우하는 IG12를 이용하 여 동화함	- 대상 지역의 규모나 이용 가능한 관측소의 수가 유사함 - 성능이 검증되었으며 유럽에서 현업에 사용 중임	- 국내 관측소가 2개에 불과한 상황에서는 비 관측 지점 보간 작업 이 무의미하므로 비효 율적임 - 검증되지 않았음

## 2. IRI-2012 모델 개선 방안

한반도 전리층 관측값을 IRI-2012에 적용하기 위한 동화기법 선정을 위해 현재 개발 중인 기법들을 비교한 결과, 유효태양활동지수를 기반으로 한 동화기법이 오랜 기간 연구되어 왔으며 현업에서 성공적으로 사용되고 있음을 확인하였다. 유효태양활동지수 기반 동화모델은 한반도와 같은 국지적 동화에 잘 적용되는 반면, 모핑 기법은 전 지구 동화에 적합한 방식으로 신경망 최적화 보간법 등을 이용한 비관측지점 보간 작업은 이천 및 제주 2개 관측소의 이오노존데 자료만 사용하는 한반도 동화모델에 불필요하여 효율이 떨어진다. 태양활동지수 중 IG12는 표준 IRI 모델에서 R12 대신 참조하므로 자료동화의 기준으로 적합하며 동화자료로는 이오노존데의 foF2 자료만으로도 충분한 효과가 있다. 따라서, 한반도 상공 전리층의 상태를 실시간 도출하기 위해 IG12 및 foF2 자료를 이용한 Effective Solar index 기반으로 IRI-2012를 개선하여야 한다.

### 가. IRI-2012 개선을 위한 요구사항

#### 1) 모델 정확도

이오노존데 관측 자료가 가용한 경우에 대해 관측과 IRI 모델 예측의 오차범위 이내에서 관측결과를 도출 할 수 있어야 한다.

#### 2) 모델의 공간적 분포 특성

동화모델은 실제적인 물리량 분포를 모사할 수 있도록 공간적으로 완만하고 연속적인 예측 결과를 제공해야 한다.

#### 3) 모델의 시간적 분포 특성

동화모델은 auto-scaling 에러 등과 같은 자료의 결함으로 인해 초래되는 1시간 이내 규모의 인공적인 이상 결과 없이 시간에 따라 연속적인 예측 결과를 제공해야 한다.

#### 4) 모델의 공간적 범위

동화모델은 전지구에 걸친 자료동화를 수행할 필요가 없으며 적용 지역 범위 내의 한정된 이오노존데 관측소의 수를 고려하여 지역적으로 효과적이고 효율적인 예측을 수행해야 한다.

#### 5) 모델의 시간 해상도

동화모델은 3시간 이내 간격의 준실시간 자료동화를 수행해야 한다.

#### 6) 모델의 자료동화 이용 범위

동화모델은 이천과 제주 이오노존데 관측소로부터 실시간으로 관측자료를 입력 받을 수 있어야 한다.

#### 7) 모델의 결과물 출력

동화모델은 단파통신 예보를 위한 VOACAP 프로그램에 입력 가능한 결과물을 산출해야 한다.

#### 나. 이오노존데 자료 품질관리

관측자료의 품질관리를 위해 관측값 적용 여부에 대한 기준을 설정하여야 한다. 이오노존데 관측기에서 사용하는 데이터 출력 S/W로 ARTIST사용하고 있다. 이오노존데 매뉴얼에서 ARTIST의 신뢰도 값을 산출되는데 통상 40% 이상의 신뢰도를 갖는 데이터만을 적용하도록 하고 있다. 또한 스포라딕 E층 발생으로 인한 반사를 6MHz 이하에서 적용하도록 하고 있다. 따라서 관측자료의 데이터 품질을 보장하기 위해서는 ARTIST의 신뢰도 값을 40% 이상인 값과 스포라딕 E층 발생시 6MHz이하일 때 관측값을 적용하지 않아야 한다. 그림4-11에서 빨간점은 관측값에서 품질관리 기준을 적용한 것으로 비정상적으로 튀는 자료나 Sporadic-E 현상에 의한 것으로 보이는 자료가 제거된 것을 볼 수 있다.

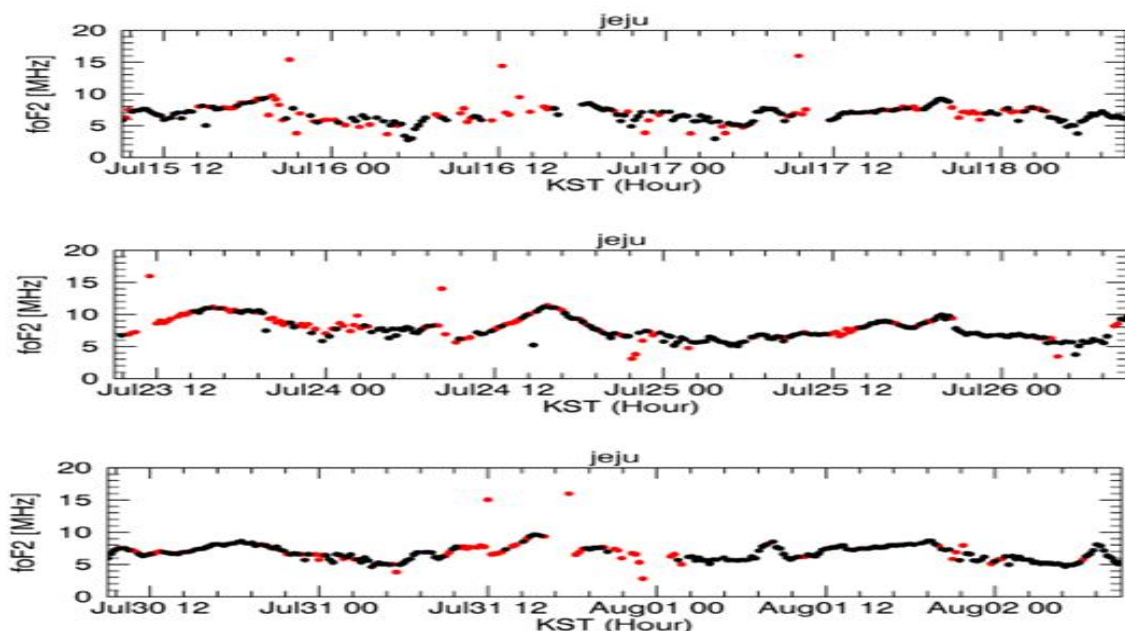


그림4-11 이오노존데 자료 품질관리 결과

### 3. IRI-2012 개선 및 검증

기존 IRI 모델에서는 지자기 위도별 기존 관측값을 통계적으로 적용하여 포출하므로 현재의 전리층 상태를 표현하지 못한다. 따라서 현재의 이천과 제주의 관측값을 기준으로 평균 흑점수를 산정하고 산정된 흑점수를 기준으로 다시 지자기 위도별 출력값을 산출하게 한다. 이러한 흑점수 재 산정은 1시간 간격으로 계속해서 산출하게 함으로써 현재 전리층 상태를 적용하도록 개선하였다. 그림4-12는 IRI 모델의 개선 개념도를 보여주고 있다.

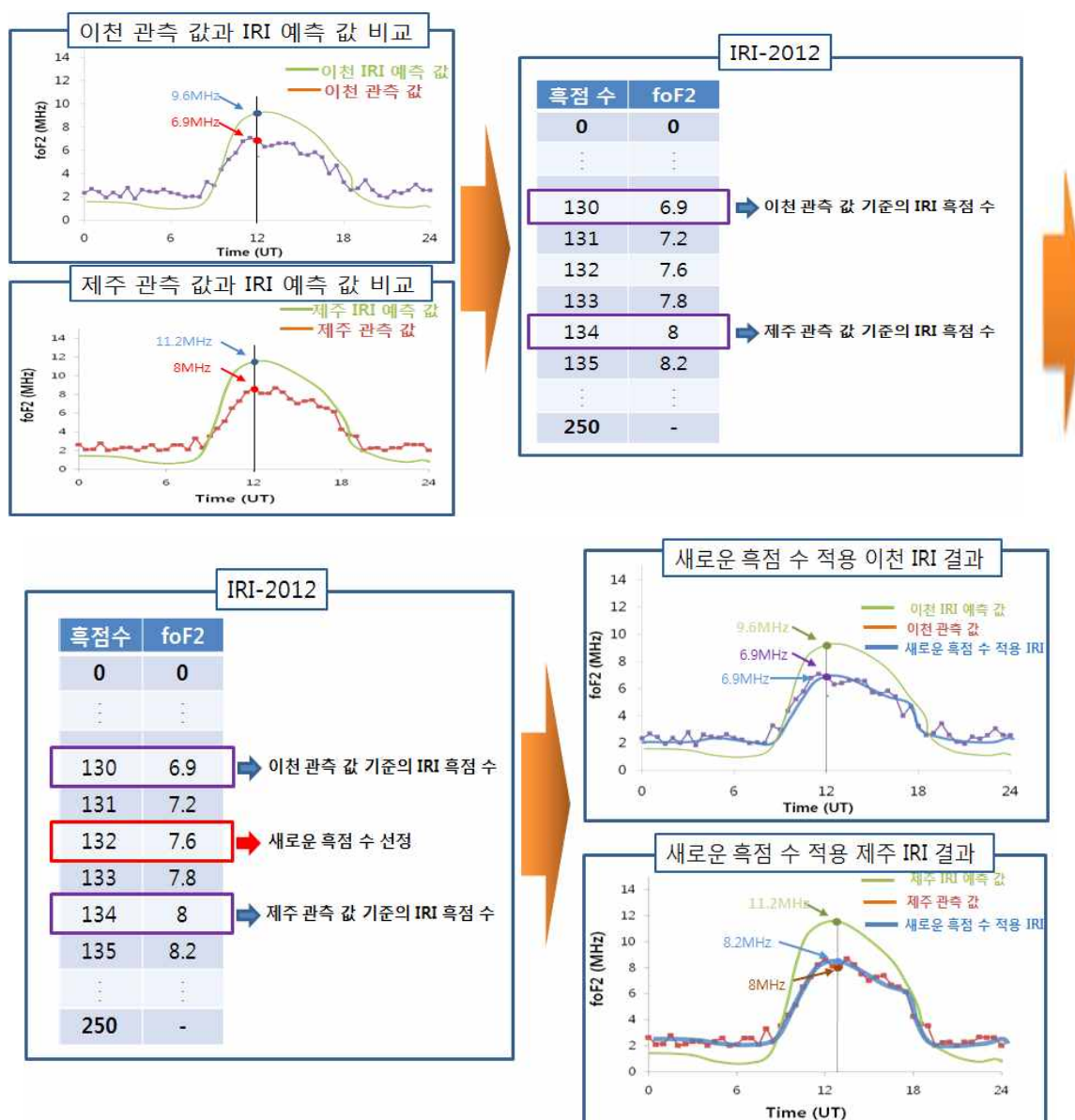


그림4-12 IRI 개선 개념도

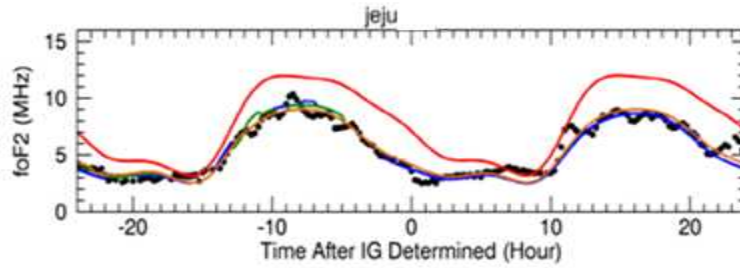
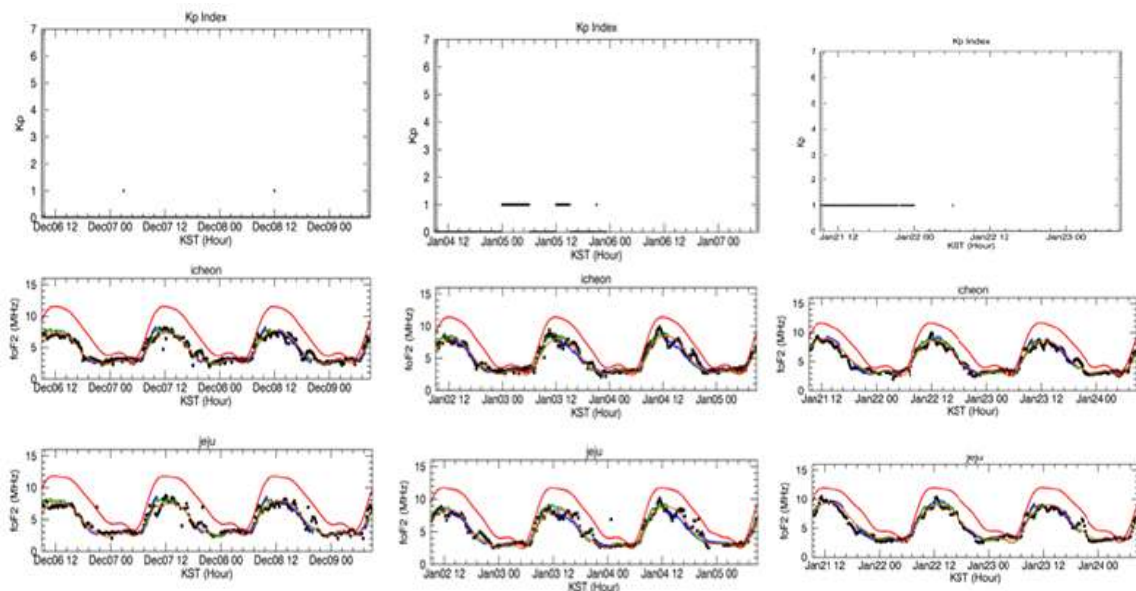


그림4-13 전리층 동화모델 성능 시험 개념도

또한 관측자료 동화주기를 결정하기 위해 그림4-13에서처럼 특정 시점을 기준으로 향후 24시간에 대한 예측값을 도출하기 위해 3시간, 6시간, 24시간의 관측자료를 사용하였다. 그림4-13은 전리층 동화모델 성능 시험 개념도로 흑색 점은 관측된 foF2 결과, 적색 실선은 표준 IRI 모델의 산출자료, 청색 실선은 3시간 자료동화 결과, 녹색 실선은 6시간 자료동화 결과, 주황색 실선은 24시간 자료동화 결과이다.

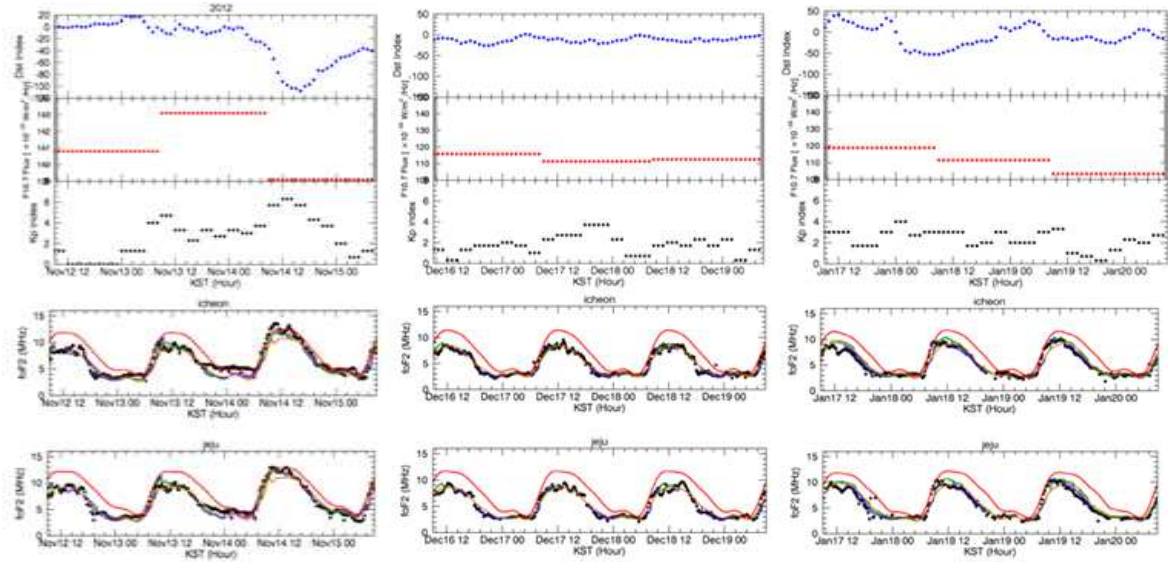
그림4-14은 Kp index를 기준으로 태양활동이 거의 없는 기간인 2012년 12월 6~8일, 2013년 1월 2일~4일, 2013년 1월 21일~23일에 대해 관측값, IRI-2012, 3시간/6시간/24시간 동화 자료값을 각각 나타내고 있다. 비교결과 IRI-2012 모델값은 관측값과 유사하나 값의 크기에 일정한 편차가 존재하였으며, 동화모델값은 3시간/6시간/24시간 모두 관측값과 비교적 잘 일치하였다.



(a) 3시간 관측자료 동화 (b) 6시간 관측자료 동화 (c) 24시간 관측자료 동화

그림4-14 태양활동이 없는 기간의 3/6/24시간 관측자료 동화결과





(a) 3시간 관측자료 동화 (b) 6시간 관측자료 동화 (c) 24시간 관측자료 동화  
그림4-15 태양활동이 활발한 기간의 3/6/24시간 관측자료 동화결과

그림4-15은 Kp index, Dst index, F10.7 flux를 기준으로 태양활동이 증가한 기간인 2012년 11월 12일~14일, 2012년 12월 16일~18일, 2013년 1월 17일~19일에 대해 관측값, IRI-2012, 3시간/6시간/24시간 동화자료값을 각각 나타내고 있다. 이 역시 태양활동이 약한 시기와 비슷하게 IRI-2012 모델값은 관측값과 유사하나 값의 크기에 일정한 편차가 존재하였으며, 동화모델값은 3시간/6시간/24시간 모두 관측값과 비교적 잘 일치하였다.

그림4-16은 태양활동이 약한 시기 3시간/6시간/24시간 동화자료 주기의 RMSE 값과 태양활동이 활발한 시기에서의 3시간/6시간/24시간 동화자료 주기의 RMSE 값을 비교하였다. RMSE는 예측값과 관측값 차를 말하며, 빨간선은 3시간, 파란선은 6시간, 녹색선은 24시간 RMSE값을 나타낸다.

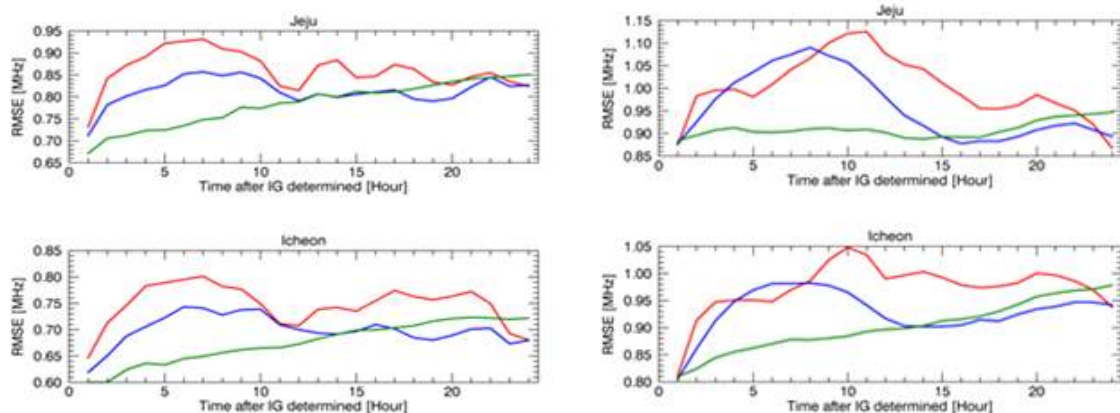


그림4-16 3/6/24시간 RUSE 값 비교

RMSE 값은 작을수록 동화모델이 실측 결과를 잘 예측했다는 것을 의미하며 동화모델 예측자료는 실제 관측결과와 1 MHz 수준의 근소한 차이를 이고 24시간 자료동화의 경우에 가장 안정적인 예측 결과를 보임을 알 수 있다. 따라서 IRI-2012 개선에 있어 24시간 관측값을 동화하여 예측값을 산출하도록 개선하였다.

아래 그림4-17은 개선된 IRI-2012 모델, 관측값, IRI-2012에 대해 태양활동 미니할때와 활발할 때를 상호 비교한 결과이다. 빨간선은 IRI-2012 모델값, 파란선은 개선된 IRI-2012값, 검정색은 관측값이다. 비교결과 태양활동이 활발할 때와 태양활동이 미니할 때 모두 개선된 IRI-2012값이 관측값에 보다 잘 맞는 것을 알 수 있다.

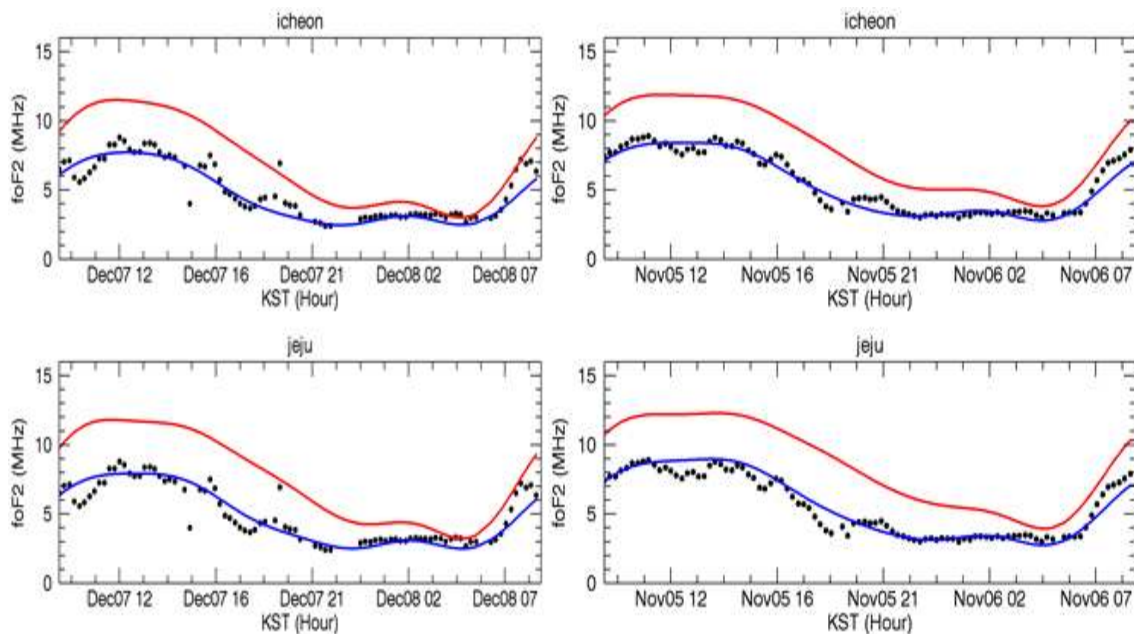


그림4-17 이천/제주 관측값과 IRI 동화모델 비교결과



## 제5장 실시간 단파통신 최적주파수 제공

### 제1절 단파통신 예보모델 개설편

#### 가. VOACAP 모델 특징 및 프로그램 구성

VOACAP(Voice of America Coverage Analysis Program) 모델은 CCIR 및 URSI 제공 자료를 기반으로 한 경험모델로 foF2 시공간 분포를 재구성하여 단파통신 주파수 정보를 산출하는 프로그램이다. 사용자가 지정한 HF 서킷 및 조건에 따라 HF 운용을 위한 최적 주파수 및 최적주파수의 시간에 따른 SNR 변화값 등을 산출한다.



그림5-1 인터넷을 통한 개별 사용자용 VOACAP 서비스 화면

VOACAP 프로그램 입력 정보는 그림5-1과 같이 시각(월 단위), 송수신 위치, 흑점수, 안테나 및 주파수 정보 등이 있으며, 출력정보는 HF 운용을 위한 최적 주파수, 신호 강도 예측값, 잡음 강도 예측값, 신호대 잡음비 확률 분포, 신호대 잡음비 요구조건 및 신뢰도 등이 있다.

VOACAP 프로그램의 최적주파수 산출 프로세스는 다음과 같다.

1단계는 CCIR 및 URSI에서 파일 형태로 포함되어 제공된 foF2 자료인 988개 계수 배열(13일간 전개계수 x 76 구면조화계수)를 가공한다. 2단계로 월별 및 태양 활동기/비활동기에 대해 총 24개의 계수 배열을 지정된 날짜의 해당 흑점수를 바탕으로 보간한다. 3단계로 산출된 988개 계수 배열로부터 foF2 시공간 분포 맵핑한다. 4단계로 foF2 시공간 분포 기반 단파통신 최적 주파수 맵핑한다.

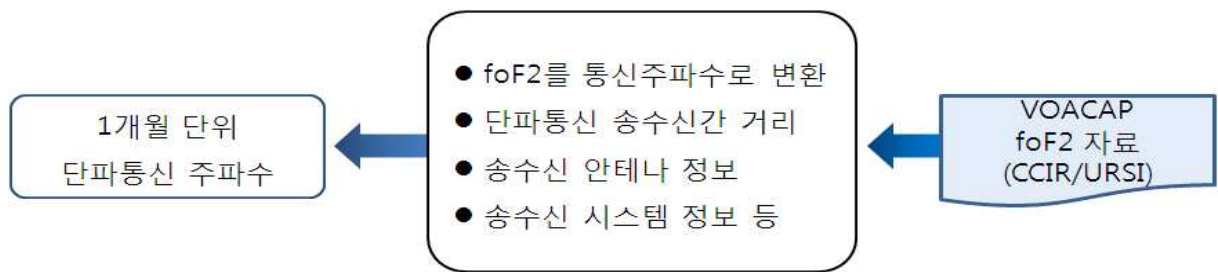


그림5-2 VOACAP 모델 입출력

VOACAP 프로그램은 총 170개 파일과 180개 서브프로그램으로 구성되어 있다. VOACAP 주요 서브루틴은 다음 표-1와 같다.

표5-1 VOACAP 주요 서브루틴

서브루틴명	내용
VOACAP	VOACAP 실행
DECRED	control card reading
REDMAP	전리층 long-term DB 읽음
GENION	전자밀도 연직분포, ionogram, reflectrix, 특정 각도에 대한 사입사(oblique) 주파수 및 거리 산출
LECDEN	전자밀도 연직분포 산출
CURMUF 등	전체 전자밀도 연직분포를 사용하여 모든 층에 대한 MUF와 circuit MUF 계산 등

## 제2절. 개선된 단파통신 예보모델 검증

국내 관측값을 적용하여 개선한 IRI-2012 모델 결과값을 VOACAP프로그램 입력자료로 사용함으로써 실시간 단파통신 최적주파수를 산출하고자 한다. VOACAP에 파일 형태로 포함된 CCIR/URSI 자료 대신 IRI 동화모델의 foF2 시공간 맵 출력자료를 VOACAP에 입력하게 되면 VOACAP은 실시간으로 동화된 IRI 모델 자료를 입력받아 현재 최적 주파수 산출하게 된다. 따라서 VOACAP 프로그램만을 이용하였을 때는 월단위 단파통신 주파수가 산출되나 관측값을 적용 IRI-2012 개선 모델을 입력자료로 이용함으로써 실시간 단파통신 주파수를 도출할 수 있다. 그림5-3은 VOACAP 기반 최적주파수 맵핑 모듈 개념도를 보여주고 있다.

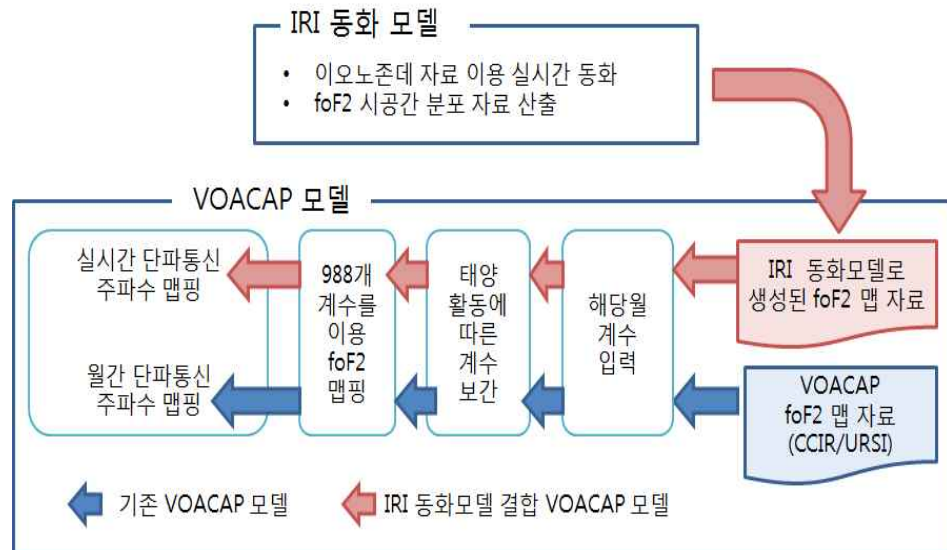
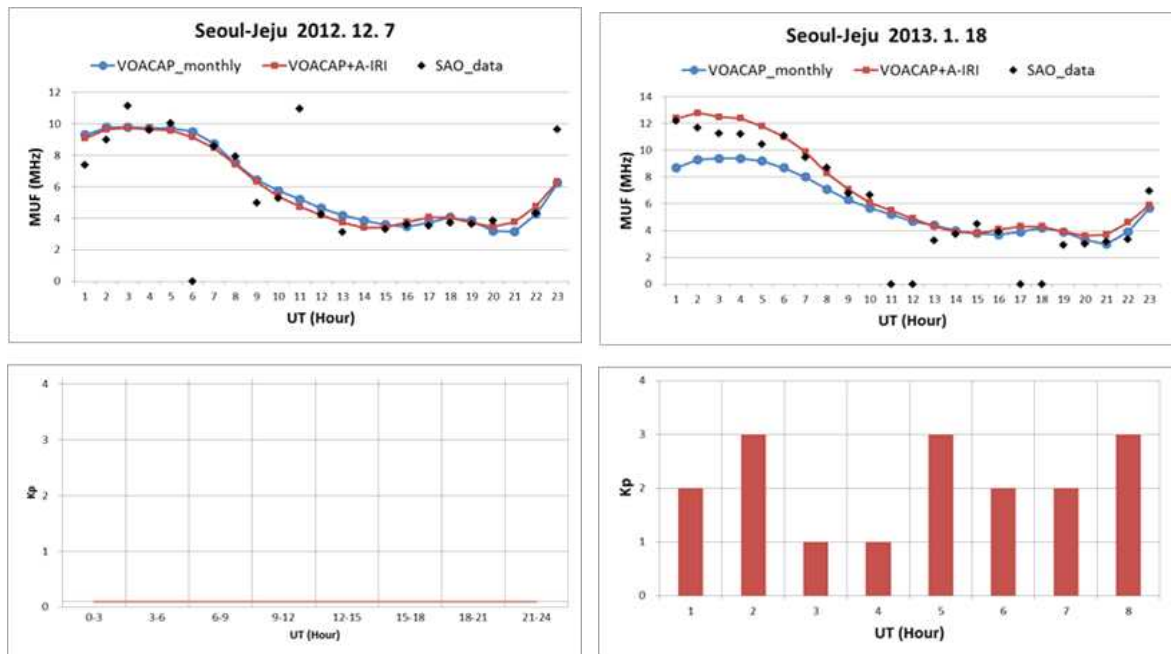


그림5-3 VOACAP 기반 최적주파수 맵핑 모듈 개념도

서울-제주 간 단파통신 MUF 산출 결과를 기존 VOACAP, 개선된 IRI-2012 모델, 관측값 3가지 방법으로 그림5-4와 같이 지자기교란으로 인한 전리층 변화가 있을 때와 없을 때를 상호 비교하였다. 그림5-4에서 VOACAP\_monthly는 기존 VOACAP으로 계산한 월평균 MUF값, VOACAP+A-IRI는 IRI 동화모델과 VOACAP을 연동하여 계산한 실시간 MUF값, SAO\_data는 제주 이오노존데 자료의 foF2 및 전리층고도 값을 사용하여 계산한 시간별 MUF값이다. 결과 분석, 전리층이 정상 상태일 때에는 IRI 동화모델-VOACAP 연동을 통한 산출 결과와 기존 VOACAP 산출 결과의 차이가 별로 없었으나, 지자기 활동 증가 등의 영향으로 전리층 교란이 발생한 경우에는, IRI 동화모델-VOACAP 연동을 통한 산출 결과가 기존 VOACAP 산출 결과보다 실제 이오노존데 기반 산출 결과에 더 가깝게 나타났다. 따라서 IRI 동화모델-VOACAP 연동을 통한 산출 결과가 이오노존데 기반 산출 결과에 비해 더욱 안정적임을 알 수 있다.



(a) 지자기교란이 없을 때 VOACAP 모델검증 (b) 지자기교란 발생시 개선된 VOACAP 모델검증  
그림5-4 지자기 교란 유무에 따른 VOACAP 모델 검증

### 제3절 실시간 단파통신 최적주파수 서비스 제공

실시간 단파통신 최적주파수 제공을 위해 이천 및 제주 관측자료를 IRI-2012 모델에 적용하기 위해 IRI 동화모델 구성서버에 입력하여 위도별 새로운 foF2 자료를 산출하고 그 결과값을 VOACAP모델에 입력값으로 사용하여 그림5-5와 같이 실시간 단파통신 최적주파수를 산출하며 산출된 최적주파수 정보를 웹 서비스를 통해 사용자에게 제공하게 된다.

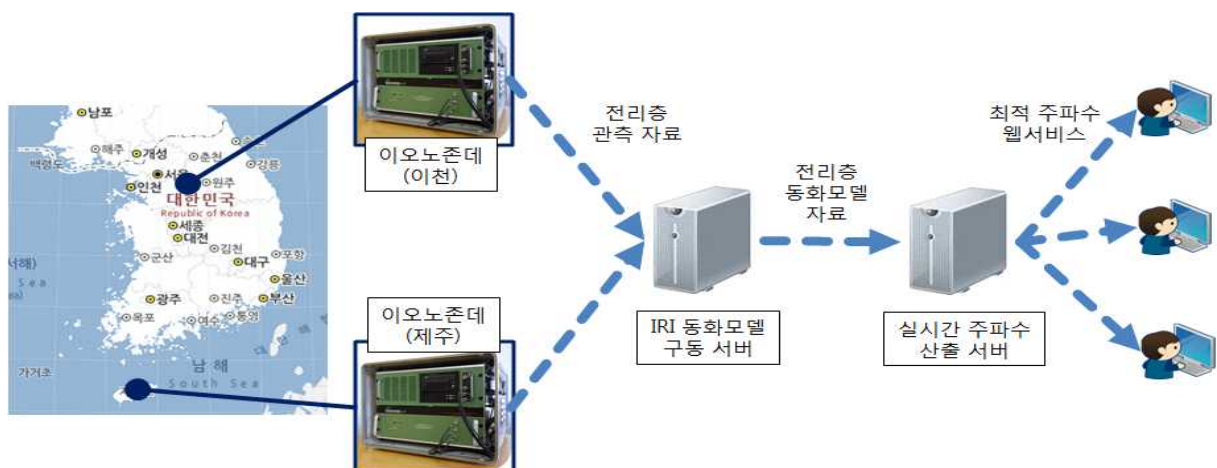


그림5-5 실시간 단파통신 최적주파수 제공 서비스 흐름도



그림5-6 최적주파수 산출 시스템의 지점대지점 사용자 화면

그림5-6은 홈페이지에서 사용자에게 실시간 단파통신 주파수 제공을 위한 화면으로 지점대지점에 대한 최적주파수 산출 화면이다. 사용자가 통신 송수신지점을 입력하면 결과물로 실시간 MUF, FOT, LUF가 산출되며 향후 24시간 후에 대한 예측주파수가 표출된다.

또한 그림5-7은 지점대지역 서비스로 사용자가 송신지점 위치를 입력하면 송신지로부터 거리에 따른 MUF 분포도가 실시간 제공되도록 하였다.

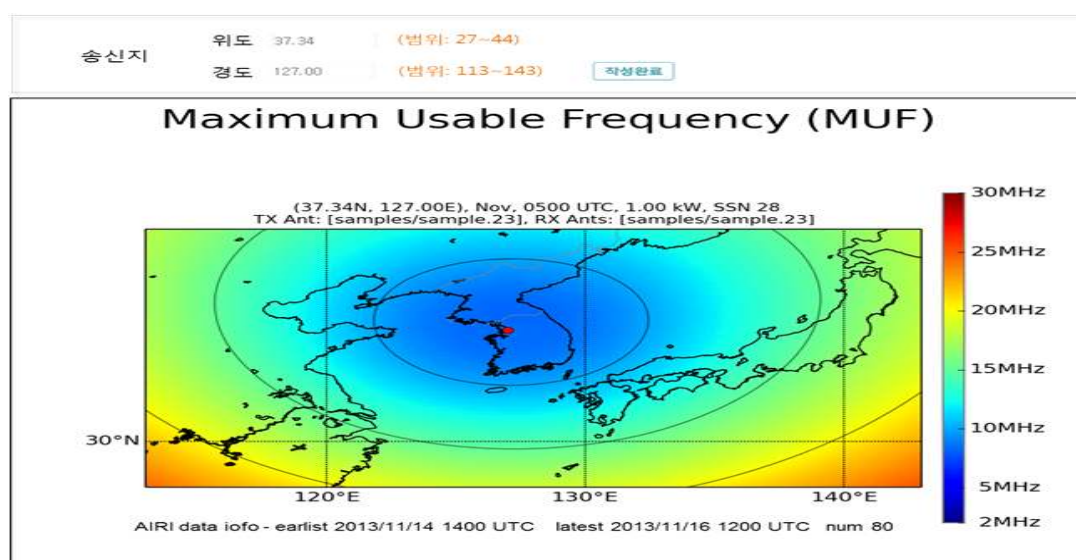


그림5-7 최적주파수 산출 시스템의 지점대지역 사용자 화면



## 제6장 결론

단파통신 주파수는 실시간 변화하는 전리층 상태에 따라 변화함으로 단파통신 사용 시 실시간 전리층 상태 정보를 반영하는 것은 매우 중요하다. 그러나 현재 우주전파센터에서 제공 중인 단파통신 최적주파수 제공 서비스는 실시간 전리층 정보를 반영하지 못하고 있어 정확한 단파통신 주파수를 제공하지 못하고 있다.

본 연구는 이러한 단파통신 서비스를 개선하기 위해 수행되었다. 먼저 실시간 전리층 상태를 분석하기 위해 국제표준 전리층 모델인 IRI-2012를 도입하여 개선하였다. IRI 모델은 경험모델로서 오랜 기간 축적된 전리층 관측 결과를 바탕으로 위도별 전리층의 평균적인 상태를 추정이 가능하다. 그러나 실시간으로 변화하는 전리층의 상태 정보를 제공하지 못하는 한계가 있다. 따라서 국내 이천 및 제주 전리층 관측값을 IRI-2012 모델에 적용이 가능하도록 동화모델로 개선하여 실제의 전리층 상태에 가까운 결과를 예측할 수 있도록 개선하였다. 또한 우주전파센터에서 사용 중인 단파통신 예보모델인 VOACAP은 송수신 지점 등의 조건에 대해 주파수 정보의 월 평균값을 제공함으로써 1개월간 단파통신 사용주파수가 동일하여 실제 사용주파수와는 차이가 있어 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있었다. 이를 개선하기 위해 VOACAP 모델의 전리층 입력 정보를 IRI-2012 동화모델 결과값을 적용하도록 개선하여 실시간 전리층 정보를 반영한 단파통신 주파수가 산출되도록 하였다.

본 연구를 통해 실시간 전리층 정보를 반영한 단파통신 최적주파수를 실시간 및 24시간 예측 주파수를 제공할 수 있도록 단파통신 서비스를 개선하였다. 특히 개선된 지점대지점서비스 국내 지역에서 군의 정기교신 및 훈련 또는 수협에서 인근바다에 선박을 대상으로 하는 어업방송에 매우 유용하게 사용될 것으로 사료된다. 또한 개선된 지점대지역 서비스는 먼 바다에서 운용되는 선박 등의 어업방송에 활용도가 매우 높을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1 Yongliang Zhang, Larry J. Paxton , Dieter Bilitza and Rick Doe, 2010, Near real-time assimilation in IRI of auroral peak E-region density and equatorward boundary , ScienceDirect , Advances in space Research 46 1055–1063
- 2 P. G. Richards, D. Bilitza, and D. Voglozin, 2010, Ion density calculator (IDC): A new efficient model of ionospheric ion densities, RADIO SCIENCE, VOL.45, RS5007
- 3 Dieter Bilitza, Lee-Anne McKinnell, Bodo Reinisch, Tim Fuller-Rowell, 2011, The international reference ionosphere today and in the future,  
J Geod, 85..909–920
- 4 Patrick A. Nsumei, Bodo W. Reinisch, Xueqin Huang, Dieter Bilitza, 2010, Comparing topside and bottomside-measured characteristics of the F2 layer peak, ScienceDirect, Advances in Space Research 46.. 974–983
- 5 J.R. Fernandez, C.J. Mertens, D. Bilitza, X. Xu, J.M. Russell III, and M.G. Mlynchzak, 2010, Feasibility of developing an ionospheric E-region electron density storm model using TIMED/SABER measurements, ScienceDirect, Advances in Space Research 46.. 1070–1077
- 6 Dieter Bilitza, 2001, International Reference Ionosphere 2000, Radio Science, Volume 36, Number 2, Pages 261–275
- 7 Bodo W. Reinisch, Dieter Bilitza, 2004, Karl Rawer's life and the history of IRI, SCIENCE DIRECT, Advances in Space Research 34..1845–1850
- 8 D. Bilitza, B. W. Reinisch, 2008, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters , ScienceDirect, Advances in Space Research 42.. 599–609
- 9 Shuanggen Jin and Jong-Uk Park, 2007, GPS ionospheric tomography: A comparison with the IRI-2001 model over South Korea,



Earth Planets Space, 59.. 297–292

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. Ierkcic (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- Å 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.*