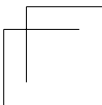
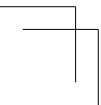


단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련

2015. 12.



제 출 문

본 보고서를 「단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련」 과제
의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 12. 31.

연구책임자 : 김 영 규 연구관(우주전파센터 예보팀)

연구 원 : 이 재 형 연구사(우주전파센터 예보팀)

한 진 욱 연구사(우주전파센터 예보팀)

장 혜 숙 주무관(우주전파센터 예보팀)

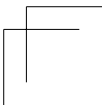
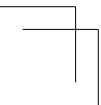
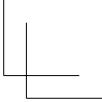
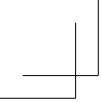


요 약 문

단파통신은 주로 긴급 구조 통신 및 원근해 선박통신, 항공이동통신 등의 특수 목적으로 현재 사용되고 있으며, 전리권 교란에 따라 단파통신 장애가 발생할 경우 선박 및 항공기의 위치보고 및 긴급 보고가 일시적으로 불가능하며, 이에 따른 추가적인 인명 피해가 발생할 수 있다. 또한 약 17만 무선국을 이용하는 단파 통신 사용자들이 불편을 겪는 등 사회 전반적으로 피해들이 예상된다. 그러므로 실시간 전리권 관측 자료를 분석하여 단파통신 장애 상황이 발생할 경우 신속히 수요자들에게 전파하여 사전 대응을 수행할 수 있도록 지원할 필요성이 있다.

본 연구에서는 우선 단파통신과 전리권의 일반적인 특징과 단파통신 사용 현황을 확인하였고, 국내외 단파통신 관련 연구 현황을 조사하였다. 그리고 단파통신 환경에 영향을 미치는 주기적인 원인과 일시적인 원인을 정리하였고, 특히 우주환경 변화 중에 중위도 전리권에 영향을 미치는 태양흑점폭발과 지자기교란 경보 상황의 발생 빈도 및 지속시간을 조사하였다. 마지막으로 전리권 foF2 관측값을 이용한 단파통신 장애 단계를 구분하여 상황 알림 서비스 방안을 마련하였다.

본 연구를 통해 마련된 단파통신 장애 알림서비스 방안을 이용하여 차후 상황 알림서비스를 개발하여 국내에서 단파통신을 사용하는 수요기관에서는 장애 발생 여부 및 원인을 신속히 파악할 수 있을 것으로 기대한다.



목 차

제1장 서론	1
제1절 연구목적	1
제2장 단파통신	3
제1절 단파통신과 전리권	3
제2절 국내외 단파통신 연구	10
제3장 단파통신 장애 원인과 우주환경의 영향	16
제1절 주기적인 전리권 변화에 따른 단파통신 장애	16
제2절 일시적인 전리권 변화에 따른 단파통신 장애	18
제3절 태양흑점폭발에 따른 단파통신 장애	22
제4절 지자기교란에 따른 단파통신 장애	27
제4장 단파통신 장애 알림 서비스	31
제1절 단파통신 장애 알림 서비스 개요	31
제2절 단파통신 장애 분석 및 알림 방안	34
제5장 결 론	38
참고문헌	40

표 목 차

[표 1] 전리권 감쇠의 종류	8
[표 2] 월간전파예보 주요 변수 정의	14
[표 3] 2014년 1월에 발생한 태양흑점폭발 발생 목록	23
[표 4] 태양흑점폭발에 의해 예상되는 피해 및 평균 발생횟수	26
[표 5] Honolulu와 Godhavn의 K 지수 분류	28
[표 6] 지자기교란에 의해 예상되는 피해 및 평균 발생횟수	30
[표 7] foF2 변화량에 따른 단파통신 장애 분류	33

그 립 목 차

[그림 1] 2003년 10월 할로윈 폭풍에 의한 전 세계 피해 사례	2
[그림 2] 전리권의 구조	3
[그림 3] 수산업협동조합 1일 출어선 현황	4
[그림 4] 동남아 항공기 운항 현황 및 보고 위치	4
[그림 5] 국립전파연구원 전리권 관측기 현황	4
[그림 6] DIGISONDE를 이용한 관측 결과	5
[그림 7] 전리권 관측기의 송신기	5
[그림 8] 전리권 관측기의 수신기	5
[그림 9] 국내 대표지역 가용주파수(서산-포항, 서울-제주)	6
[그림 10] 단파통신 개념도	8
[그림 11] IRI 모델 전자밀도 수직분포도	10
[그림 12] IRI-SIRMUP 동화모델의 지자기폭풍 기간 중 foF2 예측결과 및 실제 관측결과 비교 사례	11
[그림 13] IRI-SIRMUP 동화모델의 동화자료 관측지점 및 모델 성능 검증 위한 주변 지역 관측 지점	11
[그림 14] IRI-RTAM 동화모델 결과 예시	12
[그림 15] 호주 SWS T-index 지도	13
[그림 16] 그림형 단파예보 표출 화면	14
[그림 17] 표형 단파예보 표출 화면	15
[그림 18] foF2 일일 관측 자료(이천)	16
[그림 19] 계절별 foF2 임계주파수의 고도별 변화	17
[그림 20] 태양 주기별 전리권 전자밀도 변화	17
[그림 21] 델린저 현상에 의한 신호 감쇠 지역(D-RAP 모델)	19
[그림 22] 스포라딕 E 발생 현황(이천, 제주)	20
[그림 23] 태양흑점폭발과 지자기교란에 의한 단파통신 장애	22

[그림 24] 연도별 태양흑점폭발 발생 횟수	24
[그림 25] 태양흑점폭발의 시간대별 발생 현황(C급 이상)	24
[그림 26] 1단계 이상 태양흑점폭발의 지속시간	25
[그림 27] 연도별 지자기교란 발생 횟수	28
[그림 28] 1단계 이상 지자기교란의 지속시간	29
[그림 29] 단파통신 가용주파수(LUF, MUF, FOT)	31
[그림 30] Kp 지수 산출 방법	32
[그림 31] 2014년 단파통신 장애 발생 횟수(이천, 제주)	34
[그림 32] 2015년 1월~6월 단파통신 장애 발생 횟수(이천, 제주)	35
[그림 33] SDO 위성(미국 NASA의 정지궤도위성)의 태양흑점 폭발 순간의 모습	35
[그림 34] GOES 위성(미국 NOAA의 정지궤도 위성)에서 관측한 태양 X선 자료	35
[그림 35] 태양흑점폭발 전후 국내(제주) 전리권 관측 자료	36
[그림 36] 전리권 교란에 따른 foF2 관측값(제주)과 QDC 값의 차이	36
[그림 37] 지자기교란에 따른 국제 지구자기장 교란지수(Kp) 현황	37
[그림 38] 전리권 교란에 따른 foF2 관측값(이천)과 QDC 값의 차이	37

제1장 서론

제1절 연구목적

단파통신(HF: High Frequency)은 국제전기통신연합(ITU, International Telecommunication Union)의 전파 규정(Radio Regulation)에 의하면 단파 주파수(3 ~ 30 MHz) 사이의 주파수를 이용한 통신을 뜻한다. 단파통신은 주로 긴급 구조 통신 및 원근해 선박통신, 항공이동통신 등 특수 목적으로 현재 사용되고 있다. 이러한 단파통신은 전리권을 매질로 하여 송수신 지점간의 통신이 이루어지는 공간파, 전리권파의 성질을 가지고 있기 때문에 전리권의 상태에 매우 민감하게 의존하게 된다.

태양활동에 의해 주로 발생하는 우주환경의 급격한 변화는 전리권 교란의 주요 원인으로 과거부터 지속적으로 발생되어 왔다. 특히, 태양흑점폭발 발생 후 곧바로 낮 지역에서는 단파통신 장애가 발생하는데, 이것은 태양흑점폭발의 발생으로 평상시보다 약 10^5 이상 증가된 X선과 자외선에 의해 전리권의 D층이 이온화되기 때문이다. 전리권에 입사된 단파는 이온화된 D층에 의해 흡수 또는 반사되는 단파 감쇠 현상이 발생하며, 태양흑점폭발의 규모에 따라 수분에서 수 시간 동안 지속된다. 또한, 태양흑점폭발 발생 이후 수 일이 지나면 도착하게 되는 고에너지 양성자와 전자들로 구성된 코로나물질방출(Coronal Mass Ejection, CME)은 지구 자기권을 교란하여 전 지구 통신 시스템에 영향을 미치기도 한다.

최근 우주환경의 급격한 변화에 의해 발생하는 피해를 전파법 51조에서는 ‘우주전파재난’으로 정의하여 범국가적인 차원의 대응을 수행하고 있다. 우주전파재난은 지구 대기권 밖에 존재하는 전자파에너지의 변화로 발생하는 전파와 관련한 재난을 뜻하며, 이에 따라 단파통신에서는 큰 장애가 발생하기도 한다. 1989년 3월 14일에 발생한 지자기교란에 의해 전 세계적으로 단파통신 두절이 발생하였으며, 2003년 10월에 발생한 할로윈 자기폭풍으로 인해 한국, 호주에서는 단파통신 두절이 보고되었다. 최근 2015년 6월 23일에 발생한 지자기 교란 4단계 상황이 발생했을 때 수협에서 단파통신 장애가 보고되었다. 다행히 이에 따른 2차 피해는 보고되지 않았으나, 언제든지 단파통신 두절에 따른 2차 피해의 발생 가능성이 있어, 단파통신 장애 현황을 파악하고 대응하는 것은 중요한 부분이라 할 수 있다.



[그림 1] 2003년 10월 할로윈 폭풍에 의한 전 세계 피해 사례

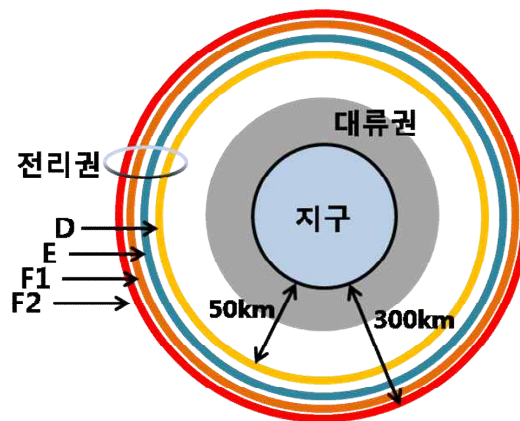
이러한 단파통신 장애에 따라 선박 및 항공기의 위치보고 및 긴급 보고가 불가능하며, 일반 단파 통신에 장애가 발생할 수 있다. 따라서 국내 일반 단파통신 사용자를 대상으로 장애 알림서비스를 제공하고자 하며, 제주와 이천의 실시간 전리권 관측 자료를 신속히 전달하여 수요기관은 단파통신 장애 상황을 실시간으로 파악하고, 그에 따른 대응을 수행할 수 있도록 지원할 목적을 가지고 있다.

본 연구의 내용은 다음과 같다. 제 2 장에서는 단파통신과 전리권에 관한 일반적인 특징 및 국립전파연구원에서 수행하고 있는 전리권 관측기의 현황을 소개한다. 또한 국내외에서 실시하고 있는 단파통신 연구 현황을 파악한다. 제 3 장에서는 단파통신 장애의 주기적인 원인과 일시적인 원인을 나누어 분류하고, 중위도에 위치한 한반도에서 단파통신 장애를 일으키는 우주환경의 변화(태양흑점폭발, 지자기교란)에 의한 단파통신 장애 원인을 분석한다. 제 4 장에서는 실시간 관측 자료를 이용한 단파통신 장애 알림 서비스를 소개하고, 이천과 제주의 전리권 관측기를 이용한 알림 서비스 알고리즘을 제시한다. 또한, 단파통신 장애 알림 알고리즘을 지난 관측 자료에 적용하여 실제 발생 가능한 장애 알림의 빈도를 통계적으로 분석하였다. 제 5 장에서는 본 연구결과의 내용을 정리하고, 향후 개선 방안에 대해 요약한다.

제2장 단파통신

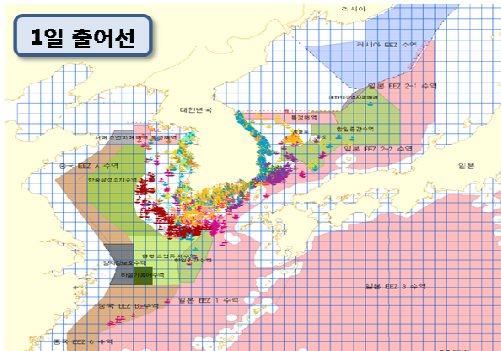
제1절 단파통신과 전리권

단파통신은 3 ~ 30MHz 주파수를 통해 저전력으로 원거리 통신하기 위해 전리권 반사를 이용하는 통신 방식이다. 전리권을 이용한 단파통신은 주로 지상에서 300km 높이에 위치한 F2층을 주로 이용하며, 단파통신의 장점은 저전력으로 중계 시설없이 원근거리 통신이 가능하다는 점이며, 단점은 도약지대 내의 통신 제한, 공간상의 잡음과 혼신이 발생할 수 있다는 점을 들 수 있다. 특히 전리권을 매질로 하여 송수신 지점간의 통신이 이루어지기 때문에 전리권의 상태에 매우 민감히 의존하게 되는 점을 들 수 있다.



[그림 2] 전리권의 구조

단파통신은 2014년 기준 전체 17만여 무선국을 기준으로 수협을 비롯한 선박 통신이 52%를 차지하며, 항공 통신이 24%, 아마추어 통신이 20% 정도를 차지하는 것으로 조사되어 있다. 2014년 10월에 수산업협동조합중앙회 어업 정보통신부 자료에 따르면 1일 평균 약 4,500여척의 어선들이 무전기를 보유한 상태로 출항에 나서고 있으며 단파 주파수별로 약 105회의 어업 방송을 실시하고 있는 것으로 보고되었다. 또한, 최근 3년간 해난사고가 평균 486건이 발생하여 실종·사망이 130명에 이르고 있어, 단파 통신을 통한 해난구조통신의 중요성 역시 크다고 할 수 있다.



[그림 3] 수산업협동조합 1일 출어선 현황



[그림 4] 동남아 항공기 운항 현황 및 보고 위치

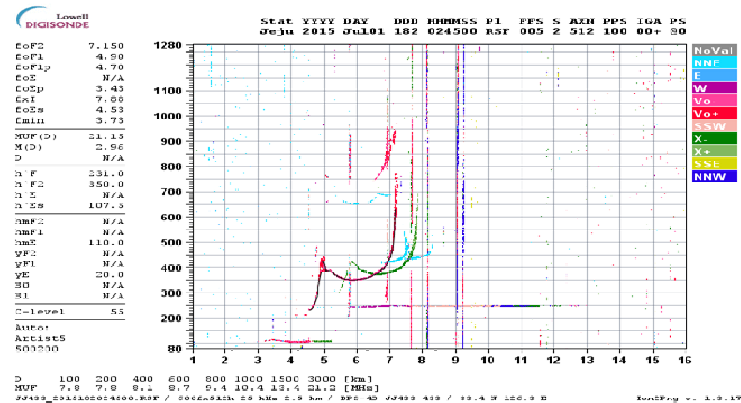
또한, 아태지역을 운항하는 저가 항공사에서는 대상의 위치보고, 긴급보고 등을 위해 단파 통신을 사용하고 있으며, 2014년 한국공항공사 자료에 의하면 제주항공, 진에어, 에어부산, 이스타항공, 티웨이항공을 포함하는 5개 항공사는 1일 50편, 년 18,000여편의 정기편을 운항하고 있으며, 1일 이용고객은 평균 약 8천명, 1년 통상 280만명이 이용하고 있어, 항공 재난 발생 시 단파 통신은 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다.

이 외에도 육·해·공군 비상상황을 대비한 최후 통신수단 확보 개념으로 단파통신이 사용되고 있으며, KBS, 아마추어무선연맹, 극동방송에서도 단파를 이용한 방송을 하고 있다.



[그림 5] 국립전파연구원 전리권 관측기 현황

국립전파연구원은 1973년부터 전리권관측기 DIGISONDE를 이용하여 전리권을 관측해 왔으며, 1973 ~ 2009년까지는 경기도 안양에서 관측하였고 청사 이전으로 2010년부터는 이천에서 관측하고 있다. 또한 2009년부터는 제주 우주전파센터에 전리권 관측 시설을 추가로 설치하여 관측하고 있다.



[그림 6] DIGISONDE를 이용한 관측 결과

DIGISONDE는 미국 매사추세츠 대학 로웰 대기연구센터에서 제작한 DPS-4D 모델이며, 송신기와 수신기의 쌍으로 구성되어 있다. 수직으로 전파를 송수신하여 전리권의 이온 밀도를 관측하는 레이더 기술을 사용하며, 세계적으로 널리 쓰이는 전리권 관측기이다. DIGISONDE 관측기의 분석프로그램은 ARTIST(Automatic Real-Time Ionogram Scaling with True-height) 5 프로그램을 현재 사용중이며, 가로축은 주파수, 세로축은 각 주파수가 반사된 고도를 그림으로 보여주며, foF2, hmF2, foEs 등의 자료를 산출해낸다.



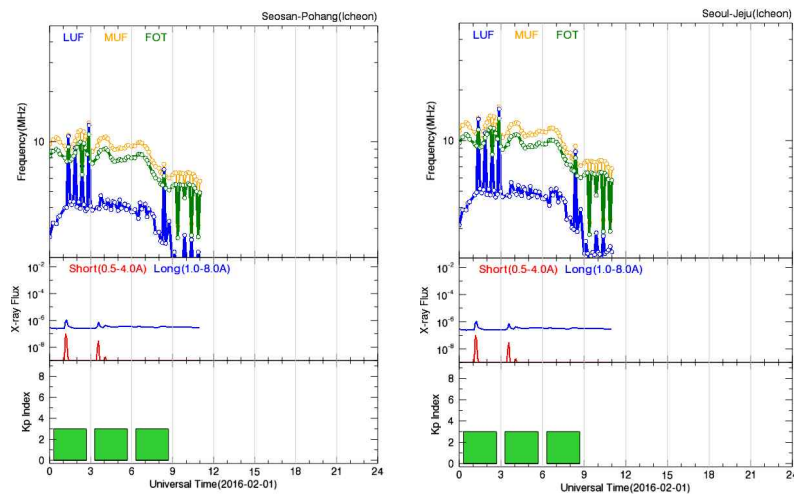
[그림 7] 전리권 관측기의 송신기



[그림 8] 전리권 관측기의 수신기

이천, 제주 관측기는 15분 간격으로 1시간당 4번의 직입사 자료를 측정하고 있으며, 자료가 산출되어 서버에 쌓이는데 걸리는 시간은 약 7 ~ 10분 정도의 시간이 소모된다.

단파통신에 사용되는 주파수는 전리권의 상태에 따라 결정되며, 특히 단파통신에 가장 적합한 주파수는 최적사용주파수이다. 최적사용주파수는 최대가용주파수의 85% 값이며, 최대가용주파수보다 높은 주파수는 전리권을 통과하여 반사되지 않아 통신에 사용할 수 없으며, 최저가용주파수보다 낮은 주파수는 F2층에 반사되기 이전에 낮은 높이의 전리권에 의해 반사 또는 감쇠되어 사용할 수 없다.



[그림 9] 국내 대표지역 가용주파수(서산-포항, 서울-제주)

1. 최대가용주파수(Maximum Usable Frequency, MUF)

송수신 점간의 거리가 주어졌을 때 전리권 반사파를 사용하여 통신할 수 있는 상한의 주파수로 임계주파수, 전리권의 높이, 송수신 점간의 거리 등에 의해 결정된다. MUF는 전리권을 통과하는 주파수와 반사하는 주파수의 경계주파수 이므로 주어진 두 송수신소 간의 주파수 선택에 있어 가장 중요한 역할을 한다. 시간, 계절, 태양 흑점 수에 따라 변하며 일반적으로 주간에는 높고 야간에는 낮다. 또한 여름이 겨울보다 높고 태양 흑점 수가 많은 해에 높고 송신전력과는 무관하다.

2. 최소가용주파수(Lowest Usable Frequency, LUF)

송수신점 간의 전리권 반사파를 사용하여 통신할 수 있는 최저의 주파수를 말하며 이러한 관계로 LUF보다 낮은 주파수는 모두 전리권 반사통신에 사용할 수 없다. LUF의 결정요인은 다음과 같다.

- 가. 시간, 계절, 송수신점 간의 위치, 태양 흑점 수 및 주파수
- 나. 수신 지점에서의 잡음
- 다. 송신전력 및 송수신 안테나의 이득
- 라. 수신 장치의 최소 필요입력 전력
- 마. 통신방식

3. 최적가용주파수(Frequency of Optimum Traffic, FOT)

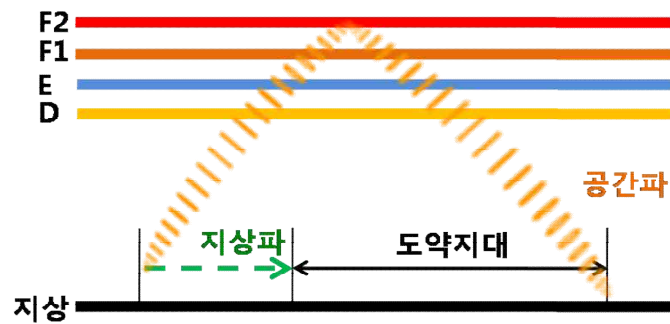
MUF에 가까운 주파수는 전리권의 전자 밀도가 변동하기 때문에 투과할 가능성이 있으며 제2종 감쇠가 커지고 LUF에 가까운 주파수는 제1종 감쇠가 커져서 경우에 따라서는 통신 불능이 되는 가능성이 있기 때문에 최적사용 주파수는 MUF의 85%가 되는 주파수로 결정된다.

$$FOT = MUF \times 0.85$$

단파통신은 주로 전리권에서 반사되는 전리권 반사파를 이용하므로 수신전계 강도는 주파수, 전리권의 상태에 따라 크게 달라지며 전리권 상태는 시간, 일, 계절 및 기후 조건 등에 따라 변화하게 되므로 전리권 상태를 예측하는 것이 통신에 아주 중요하다. 단파는 파장이 짧으므로 지표파는 감쇠가 심하여 거의 실용성이 없다. 그러나 전리권 반사파는 F층 반사로 전파되는데 제1종 감쇠가 적으므로 소전력으로 원거리 통신이 가능하다. 편의상 도약 거리 이내를 근거리, 그 밖을 원거리라고 하면 거리에 따른 전파특성은 다음과 같다.

1종 감쇠	2종 감쇠
<ul style="list-style-type: none"> · 전리권을 통과 시 받는 감쇠 · 주파수의 제공에 반비례 · 전자밀도, 평균 충돌 횟수에 비례 · 전리권을 비스듬히 통과할수록 감쇠가 크다 · LUF 결정 · 저위도, 여름, 주간(정오)에 감쇠 최대 	<ul style="list-style-type: none"> · 전리권을 반사할 때 받는 감쇠 · 주파수의 제공에 비례 · 평균 충돌 횟수에 비례 · 전리권의 침투 깊이에 따라서 감쇠가 크다 · MUF 근처에서 감쇠 최대 · 태양 활동 주기, 계절, 시각에 따라 변화

[표 1] 전리권 감쇠의 종류



[그림 10] 단파통신 개념도

1. 근거리 전파

송·수신점 부근에서는 직접파, 지표파 및 전리권파가 있는데 지표파는 감쇠가 크고 직접파는 오히려 초단파 쪽이 유리하므로 활용되지 않는다. 도약거리 이내의 불감지대에서도 미약하나마 수신이 되기도 하는데 이는 전리권 산란파의 스포라딕 E층의 반사에 의한 것이다

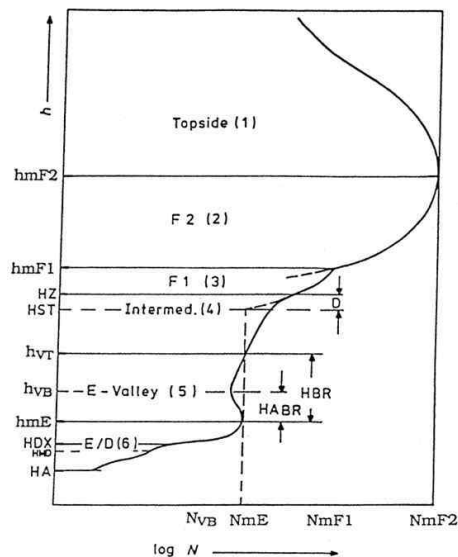
2. 원거리 전파

F층 반사파에 의존하므로 MUF보다 낮은 주파수를 선택하여야 하며 전파 특성은 전리권의 상태, 입사각 등에 의해서 달라진다. 임계 주파수보다 높은 주파수를 사용할 때에는 입사각이 작을수록 투과할 가능성이 커진다. 또 전자 밀도가 클수록 임계 주파수의 전파는 반사가 잘 되지만 전리권에서의 감쇠가 커지므로 MUF의 85%의 주파수를 사용한다.

주간과 야간의 일출, 일몰시에는 그 중간쯤 되는 전파를 사용함으로써 안전한 통신을 할 수 있다. 전파 통로가 고위도 지방을 통과하면 오로라, 지자기폭풍 등의 영향을 많이 받아 전파 상태가 불안정하여 진다. 지자기폭풍이 끝나면 평상시보다 수신 상태가 좋아질 때도 있다. 또 고위도 전파 시에는 델린저 현상의 영향을 받지 않는다. 동일 거리에 있어서 남북간의 통신이 동서간의 통신보다 신뢰도가 높고 연속적인 통신을 확보하기가 용이하다. 그 이유는 동서간 통신보다는 남북간 통신로가 전 통로에 걸쳐 균일한 태양 광선을 받기 때문이다. 공전의 영향은 비교적 적지만 적도를 포함하는 남북 통신이 더 많은 영향을 받는다.

제2절 국내외 단파통신 연구

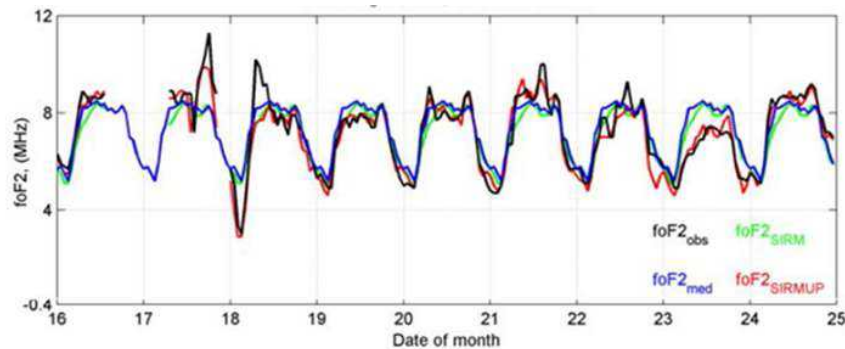
국제 전파과학 기구(International Union of Radio Science, URSI)와 우주과학위원회(COMmittee on SPace Research, COSPAR)는 1960년대부터 경험모델인 IRI 모델 개발 프로젝트를 진행하고 있다. IRI는 전 세계 이오노존데 관측망의 관측 자료를 기반으로 개발된 경험모델로써, 모델의 산출량은 지자기폭풍이 없을 때의 전자밀도, 전자온도, 이온온도, 화학 조성 (O^+ , H^+ , He^+ , NO^+ , O_2^+), 이온 이동속도, 총 전자량(Total Electron Content, TEC) 등이 있다. 회원국은 약 20여 개국으로 우리나라도 회원국으로 가입하고 있으며, 해당 프로젝트를 통하여 IRI 모델 개발 및 관측 자료를 통한 검증 작업이 수행되고 있다. 최근 IRI의 정밀도를 개선하기 위하여 전 세계 이오노존데 관측 자료를 활용한 동화모델 기술 개발이 진행 중에 있다.



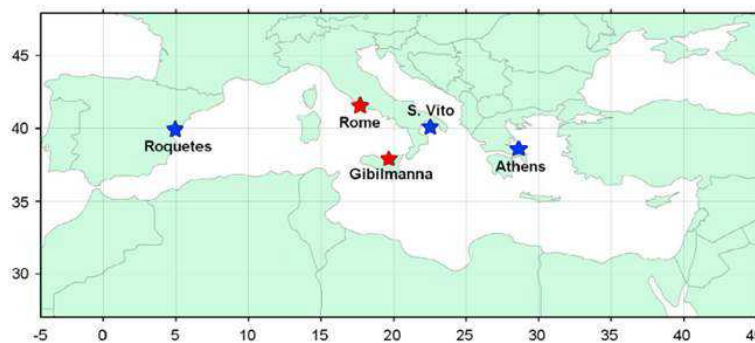
[그림 11] IRI 모델 전자밀도 수직분포도

1990년대 후반부터 지구관측위성 측정 자료의 정밀보정 등의 수요에 의해 전리권의 실시간 상태를 정확하게 모사하는 기술이 필요하게 됨에 따라, 전리권 동화모델에 대한 연구가 여러 그룹에 의해 진행되었다. IRI 경험모델을 기반으로 한 대표적인 전리권 동화모델 또는 동화기법으로는 태양활동지수 이용 동화, GPS 자료 이용 동화, 모델 변형 기법 등이 있다.

미국 NASA GSFC(Goddard Space Flight Center)에서 지자기활동지수 IG12를 이용한 foF2 자료 동화모델을 개발(Bilitza et al., 1997)하였으며, 70여 개 이오노존데에서 수집된 foF2 측정 자료를 이용하여 IRI 모델을 동화하였다. 해당 동화모델 결과는 Geosat 위성의 단일 주파수 기반 고도 측정자료의 전리권 영향 보정에 활용되었으며, 이탈리아 INGV 및 영국 RAL이 공동 개발한 이탈리아 지역 대상 국지적 동화모델의 경우(Pezzopane et al., 2011) IRI와 SIRMUP 전리권 모델을 연계하여 3차원 모델을 구성하는데, 태양활동지수 R12를 이용하여 foF2, M(3000)F2, 전자밀도프로파일 자료동화를 수행하고 있다.



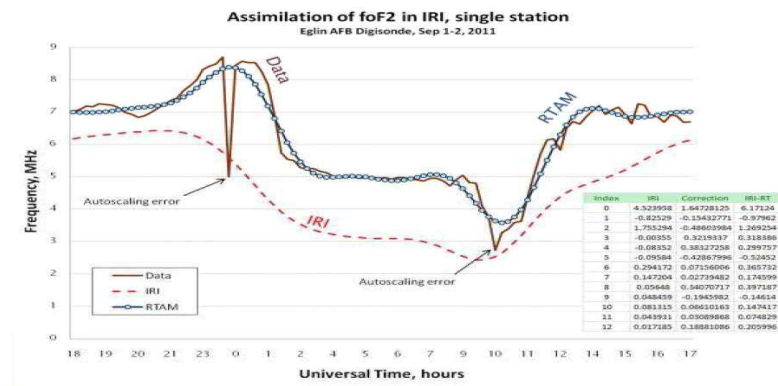
[그림 12] IRI-SIRMUP 동화모델의 지자기폭풍 기간 중 foF2 예측결과(적색) 및 실제 관측결과(검정색) 비교 사례(출처 : Zolesi et al. 2004)



[그림 13] IRI-SIRMUP 동화모델의 동화자료 관측지점(적색 표시) 및 모델 성능 검증을 위한 주변 지역 관측 지점(청색 표시)
(출처 : Pezzopane et al. 2011)

유효태양활동지수를 기반으로 하는 동화모델은 Auto-scaling 오류의 영향을 적게 받으며 국지적 범위의 전리권 모사에 적합한 것으로 알려져 있다. (Galkin et al. 2012)

캐나다 New Brunswick 대학에서 GPS 기반 TEC(Total Electron Content) 자료를 이용한 동화 기법을 개발하였다.(Komjathy et al., 1998) 해당 결과는 Geosat, Follow-On, ERS (European Remote Sensing) 위성 등의 단일 주파수 기반 해양 표고 측정 자료의 보정에 활용되었다. 스페인 Politecnica de Catalunya 대학에서는 GPS의 EC (Electron Content) 실측 자료를 이용한 동화 기법을 개발하였다.(Hernandez-Pajares et al., 2002)

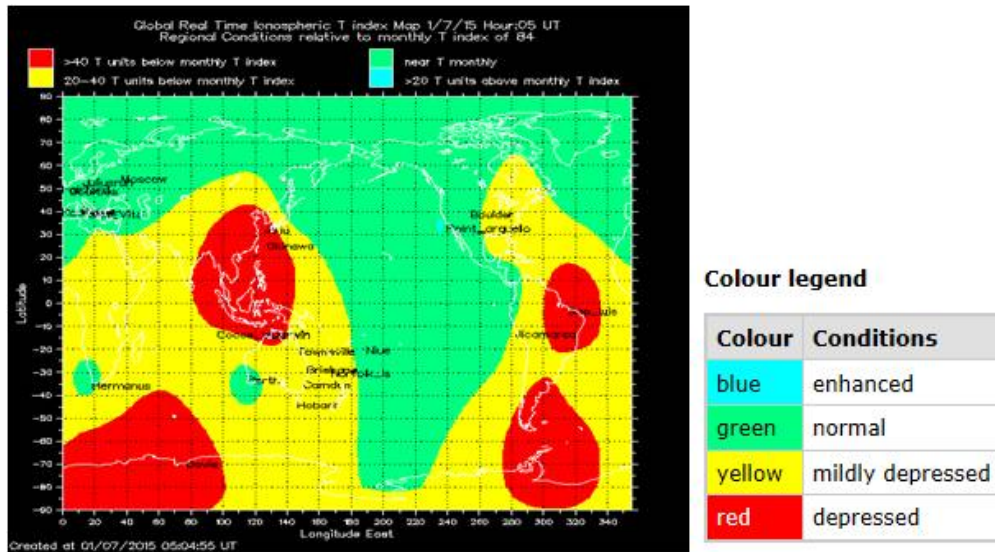


[그림 14] IRI-RTAM 동화모델 결과 예시(출처 Galkin et al. 2012)

미국 Massachusetts Lowell 대학에서는 모핑(Morphing) 기법 기반 IRI-RTAM (Real-Time Assimilative Mapping) 모델을 개발하였다.(Galkin et al., 2012) 이 모델은 전 지구적 규모의 전리권 동화를 위해 GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory)의 세계 42개 이오노존데 관측소의 측정 자료를 이용하여 관측 지점 별로 시간 방향에 대한 모델 변형과 미 관측 지역에 대한 보간을 수행하였다.

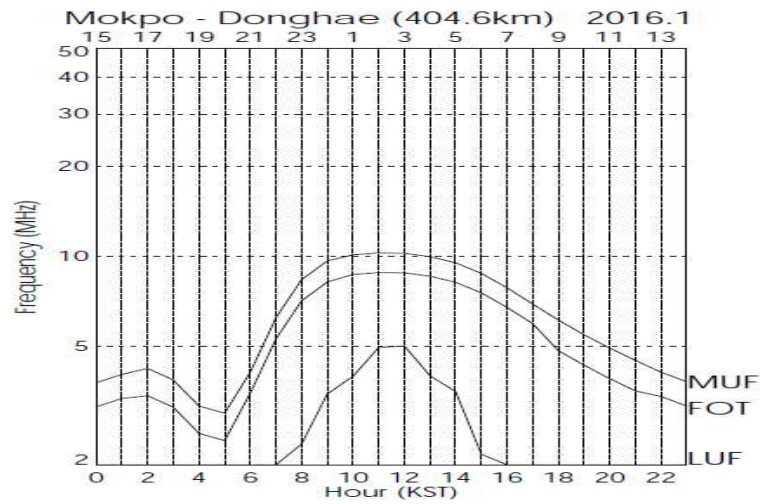
전리권 변화에 대한 지수값들도 개발되었는데 호주 SWS(Space Weather Services)에서는 전리권의 한 달 예측 값과 현재 관측되고 있는 전리권의 한시간 평균값의 차이를 이용한 T-index 지도를 제공하고 있다. T-index는

-50 ~ 200 사이의 값을 가질 수 있으며, 전리권교란 동안에는 현저하게 감소하거나 음의 값을 가지게 된다. 또한 L_{UI} 는 태양 흑점수와는 독립적인 IG 라고 하는 전리층 지수를 만들었다. 이는 13개 전세계 중위도 전리권 관측소에서 얻어진 foF2값의 월 중앙값이 사용되었다. 그리고 1964년 Minnis에 의해 만들어진 IF_2 지수가 있다. 이 지수는 전 세계 13개 전리권 관측 자료를 이용하였으며, 선형회귀 방정식을 이용하여 월간 중앙 foF2와 3개월 태양 흑점수와 관계로 값을 구한다.



[그림 15] 호주 SWS T-index 지도

국립전파연구원은 ITU-R 전리권 모델을 기반으로 전리권의 감쇠 및 투과를 계산하여 특정 지점간·지역간 최대·최적·최소 단파주파수를 제공하는 월간전파예보를 매달 제공하고 있다. 예보의 주요 인자로는 최적 단파 주파수 산출을 위한 주파수, 안테나(종류, 이득 패턴), 송신기 출력, S/N비, 발신각도, 수신지역 잡음레벨 등이 있다. 모델 계산을 통해 한 달간의 전파예보(표, 그림) 결과 산출한다. 그림형 단파예보는 이미 알고 있는 송수신 지점간의 거리를 바탕으로, 시간과 주파수에 따른 단파 통신이 가능한 최대·최적·최소 단파 주파수 산출한다.

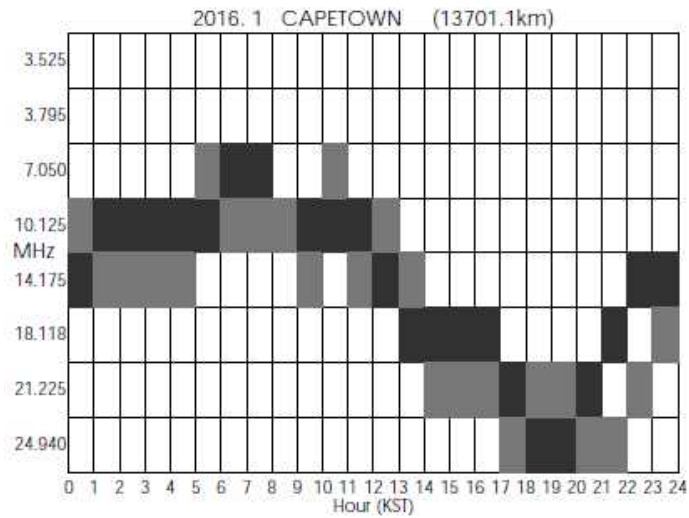


[그림 16] 그림형 단파예보 표출 화면

변수	주요 내용	비고
Hours(KST)	세계시간	가로축 상단
	한국시간(세계시간+9시간)	가로축 하단
Frequency(MHz)	주파수(MHz)를 log 단위로 변환	세로축 좌측
MUF (Maximum Usable Frequency : 최대사용주파수)	송수신 지점간 전리권 반사파를 사용하여 통신 할 수 있는 상한의 주파수	기간 : 15일 이상 / 1달 교신확률 : 90% 이상
FOT (Frequency of Optimum Traffic : 최적사용주파수)	송수신 지점간 전리권 반사파를 사용하여 통신할 수 있는 최적의 주파수	기간 : 27일 이상 / 1달 교신확률 : 90% 이상
LUF (Lowest Usable Frequency : 최소사용주파수)	송수신 지점간 전리권 반사파를 사용하여 통신할 수 있는 최소 주파수	기간 : 3일 이하 / 1달

[표 2] 월간전파예보 주요 변수 정의

표형 단파예보는 시간 및 주파수에 따라 사용가능한 최적 단파주파수(1순위 주파수)와 2순위 및 사용불가능한 주파수를 세 가지 색깔의 표 형태로 산출한다.



[그림 17] 표형 단파예보 표출 화면

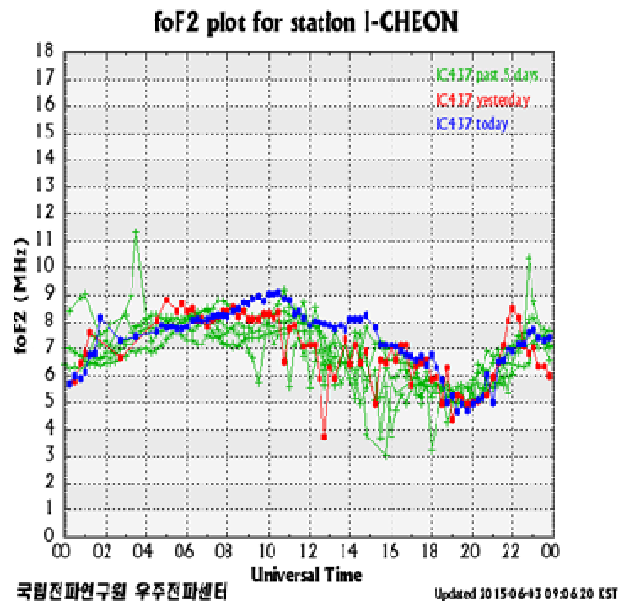
※ : 사용가능한 1순위 주파수, : 2순위 주파수, : 교신 불가 주파수

2012년부터 이천에 설치된 이오노존데 관측자료를 이용하여 국내 대표지역의 최적주파수 실태 서비스를 시행중이다. 단파통신 이용자들은 1시간 간격으로 서울과 제주, 서산과 포항사이의 최대, 최소, 최적 가용주파수를 제공받을 수 있다.

제3장 단파통신 장애 원인과 우주환경의 영향

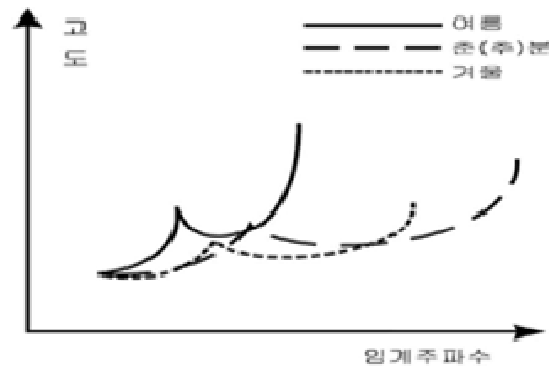
제1절 주기적인 전리권 변화에 따른 단파통신 장애

단파통신은 전리권을 매질로 하여 송수신 지점간의 통신이 이루어지기 때문에 전리권의 상태에 매우 민감히 의존하게 된다. 전리권은 크게 일변화, 계절변화, 태양활동 주기에 따라 규칙적으로 상태가 변화한다.



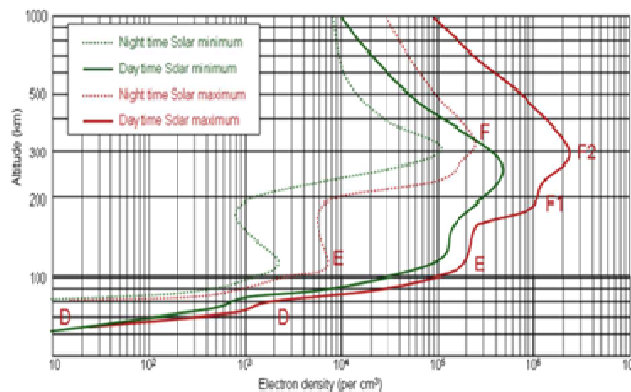
[그림 18] foF2 일일 관측 자료(이천)

일변화는 태양의 일출과 일몰에 따른 태양의 천정각 변화에 기인하며, 낮시간은 밤시간에 비해 태양에 의한 대기의 이온화로 높은 주파수가 형성된다. 각 층에 대한 주파수의 포괄적인 일 변화는 대체로 새벽무렵인 6시경에 최소를 나타내고 정오에 최대를 보이고 있다. 더불어 각층의 높이는 정오에 최소를 나타내고 새벽 6시경에 최대를 나타낸다. 이것은 태양광선에 의한 이온층의 광이온화 현상이 정오에 최고조로 달하여 밀도가 높아지고 이온층의 각 층 하부에까지 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.



[그림 19] 계절별 foF2 임계주파수의 고도별 변화

계절변화는 지구의 자전축이 기울어진 상태로 공전함에 따라 태양 고도가 계절별로 변함에 따라 변화하게 되며, 국내 전리권 변화 분석에 따르면 봄철(3~4월)과 가을(10~11)월에 가장 높은 주파수를 형성하며, 여름(7~8월)월에 가장 낮은 주파수를 보인다. 또한 봄과 가을은 낮과 밤의 주파수 변화 차이가 크게 나타나며, 여름에는 낮과 밤의 차이가 거의 나타나지 않는 특징이 있다. 가상높이의 변화는 주파수의 변화와는 다르게 5, 6, 7월경에 최고점을 나타내면서 지속적으로 3개월간 유지되는 것으로 알려져 있다.



[그림 20] 태양 주기별 전리권 전자밀도 변화

태양활동주기는 태양활동이 활발해지는 극대기일 경우 태양의 X선과 자외선의 양이 증가하여 전리권의 이온화율이 높아지므로 극소기에 비해 좀 더 높은 주파수를 가지게 된다.

제2절 일시적인 전리권 변화에 따른 단파통신 장애

일변화, 계절변화, 태양활동주기에 따른 규칙적인 변화와 함께 단파통신 장애나 두절을 발생시킬 수 있는 일시적인 변화가 있다.

1. 페이딩(fading)

전파를 수신하고 있을 때, 수신파의 세기가 변화하여 수신음이 커졌다 작아졌다 하거나 찌그러지는 등의 현상으로 전파의 수신 상태가 시간적으로 변동하고, 수신음이 불규칙적으로 변동함으로써 수신에 지장을 주는 현상이다. 페이딩의 원인은 2개 이상의 다른 지표파와 전리권과 또는 공간파 상호간의 간섭, 전리권에 있어서의 공간파 흡수상태의 변동, 전파의 전리권 밀도 변화에 의한 도약거리의 변동, 반송파 측파대 또는 상하 측파대 등의 주파수 차에 의한 흡수·반사에 차이가 생길 때 등을 들 수 있다.

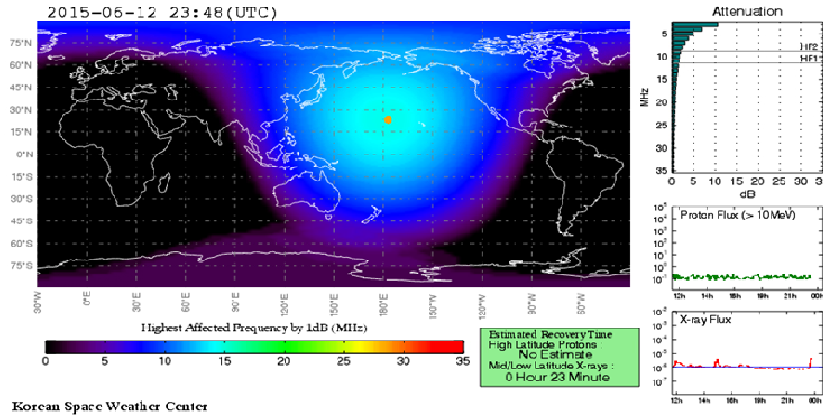
2. 반향(echo)

동일한 송신소에서 발사된 전파가 2개 이상의 통로를 거쳐 수신소에 도달할 때, 일정한 시간차를 가지고 동일한 전파가 간격을 두고 차례로 도달하여 산울림과 같은 상태로 들리며, 이것 때문에 신호가 찌그러져서 들린다. 반향(echo)의 종류로는 지구 표면의 안쪽과 바깥쪽으로 동일한 신호가 나누어 돌아와 생기는 역회전 반향, 송신소 근처에서 산란파에 의하여 생기는 근거리 반향을 들 수 있으며 이러한 반향은 고속도로 통신이나 사진 전송에 방해를 준다. 또한 지자극반향은 지구 자극 부근을 통과하는 단파 신호가 독특하게 일그러져서 발생하며, 이외에도 다중 신호에 의한 반향, 장시간 지연 반향 등이 있다.

3. 룩셈부르크(Luxembrug)현상

전리권에서 2개의 다른 전파가 반사될 때, 한편의 전파가 강할 경우, 약한 전파가 강한 전파에 간섭하여 혼신을 일으키는 현상으로 이것은 최초로 룩셈부르크와 베트무스터 사이에 발생하여 그 이름이 붙여졌다.

4. 델린저 현상



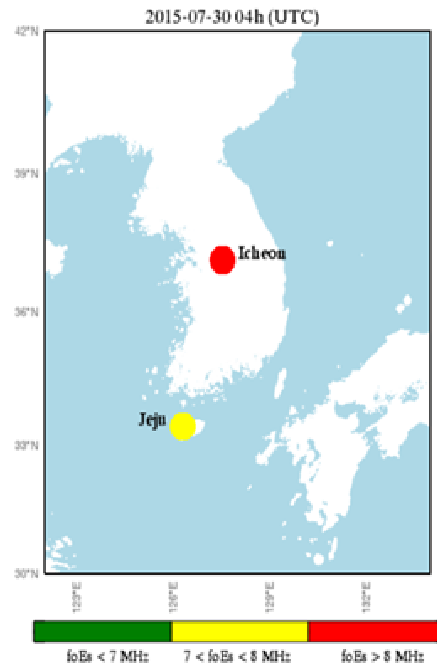
[그림 21] 델린저 현상에 의한 신호 감쇠 지역(D-RAP 모델)

단파 통신에서 전파 소실현상으로 태양이 비치는 지구의 반대 면에서 갑자기 몇 분 내지 1시간 정도 수신 감도가 급격히 저하되는 현상으로 1935년 델린저가 이 현상의 주기가 태양 자전주기의 2배인 54일이라고 지적한데서 붙여진 이름이다. 델린저 현상의 원인은 태양흑점 폭발로 방사되는 자외선이 돌발적으로 증가하여 일시적으로 전리권을 교란하는 것으로 D, E층의 밀도가 커져 1종 감쇠가 심해진다. 델린저 현상은 태양이 비추는 지구의 절반에만 나타나며 출현횟수가 잦고 회복도 빠르며, 높은 단파주파수 일수록 영향이 적다.

5. 지자기폭풍

단파의 원거리 통신에서 전리권이 교란되어 수신 강도가 서서히 저하하여 몇 시간 내지 몇 일간 수신이 불가능한 상태가 지속되다가 다시 서서히 회복되는 현상으로, 그 원인은 태양폭발에 의하여 태양에서 방사되는 대전 미립자가 대기 상층부에 충돌하여 전이를 일으켜, 지구 자기장과의 상호작용으로 고위도에 집결해서 전리권을 요란하여 발생한다. 지자기폭풍은 밤·낮 구별 없이 전 세계 어느 곳에서나 발생한다. 특히 지자기폭풍은 극지방에서 처음 발생하여 저위도로 확대되며, 주파수가 높을수록 불안정하고 회복도 느리면서 흑점이 많은 해에 발생 횟수가 많고 정도가 세다.

6. 스포라딕 E층 (Sporadic E)



[그림 22] 스포라딕 E 발생 현황(이천, 제주)

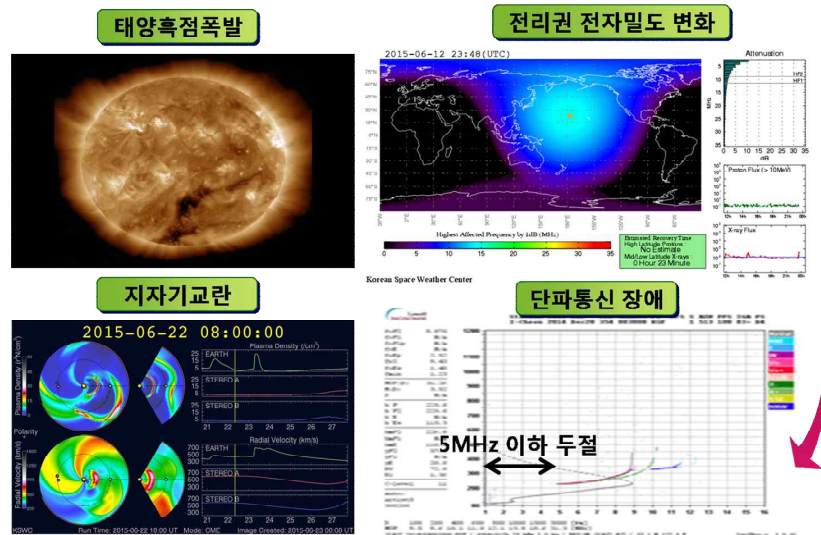
전리권 E영역에서 고립되어 불규칙적으로 발생하는 고밀도의 얇은 전자구름 층을 Sporadic E라고 한다. Sporadic E는 지상 90~130km 사이에 생성되고 너비는 수 km~수백 km에 이르기도 한다. 발생 원인은 열권의 바람에 의해 생성되는 것으로 생각되고 있다. 이러한 Sporadic E층의 갑작스런 발생에 의해 HF 통신 장애와 VHF 통신 두절 등이 일어난다. Sporadic E는 주간에 빈번하게 발생하고, 늦봄에서 초가을에 집중적으로 발생하는 것으로 관측되고 있다.

7. 잡음(radio noise)

전파를 수신 할 때 명료도를 저하시켜 통신을 방해하는 요소로 공전 잡음, 태양 잡음, 우주 잡음, 인공 잡음이 있다. 공전잡음(static noise)은 대기 중의 자연 현상에 의하여 발생하는 공중전기의 방전으로 번개에 의한 것이 많으나, 전하를 띤 눈, 비 등의 방전에 의해서도 발생하는데 넓은 주파수에 걸쳐 나타나며, 장파대에 심하고 파장이 짧을수록 감소한다. 심할 경우 통신이 두절될 만큼 방해를 일으킨다. 태양 잡음은 태양에서 발생하는 열 요란 잡음인데, 태양 활동과 수반하여 발생하고 지구상에 도달하는 잡음 전파로써 델린저 현상, 지자기교란 등에 의해 발생할 수 있으며 지상에서 수 10MHz대까지 관측되고 있다. 우주 잡음은 태양 이외의 항성에서 오는 잡음으로써 항성의 열 요란에 기인하며 특히 은하계 중심방향에서 오는 것이 가장 심하다. 인공잡음은 인간 사회에서 발생하는 잡음으로써 도시에서 집중적으로 많이 발생된다. 주요 원인으로 자동차, 발전기나 전동기의 스파크, 고주파 이용설비, 의료기, 고압 송전선의 코로나 방전 등이며 이를 해소하기 위해 수신소를 교외에 설치한다.

제3절 태양흑점폭발에 따른 단파통신 장애

태양흑점폭발 발생 이후 8분 20초 후 증가된 자외선과 X선이 지구의 낮 지역에 영향을 미치게 된다. 이 고에너지 복사는 대기입자에 의해 흡수되어 에너지 상태를 여기시켜 광전효과에 의해 자유전자를 증가시킨다. 지구의 낮 지역 전체에 걸친 D, E층의 밀도는 급격히 증가한다. HF 파장대의 단파는 전리권 하층의 입자증가로 인해 흡수되는데 그 결과 전파통신에 장애를 일으킨다. 이를 델린저 현상(Dellinger effect)이라 한다. 델린저 현상은 수분에서 수 시간 지속되고 태양이 머리위에 있는 적도 지역에서 가장 심하다. 태양전파 폭발에 의해 급전리권교란(SID)이 발생하고, 그로 인해 단파두절(델린저) 및 VHF/UHF 간섭이 일어나는 것으로 관측되고 있다.

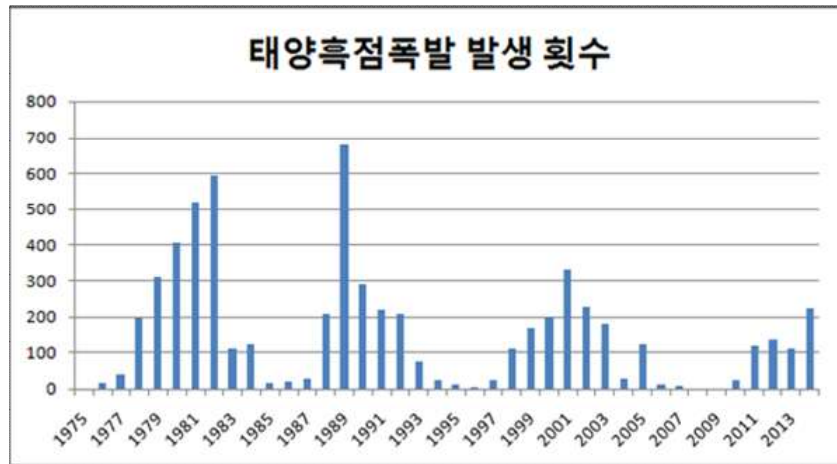


[그림 23] 태양흑점폭발과 지자기교란에 의한 단파통신 장애

델린저 현상이 얼마나 빈번히 발생하는지 알아보기 위해 지난 1975년부터 2014년까지 관측된 태양흑점 폭발 관측 자료를 분석하였다. 태양흑점폭발 관측 자료는 미국 해양대기청(NOAA) 우주환경예보센터(SWPC)에서 제공하고 있는 지구정지궤도위성인 GOES 위성에서 관측된 X 선 플럭스 관측 자료를 이용하였다. 이 관측 자료는 태양 흑점폭발의 발생시각, 최대값시각, 종료시각, 규모, 발생흑점(위치) 정보를 포함하고 있다.

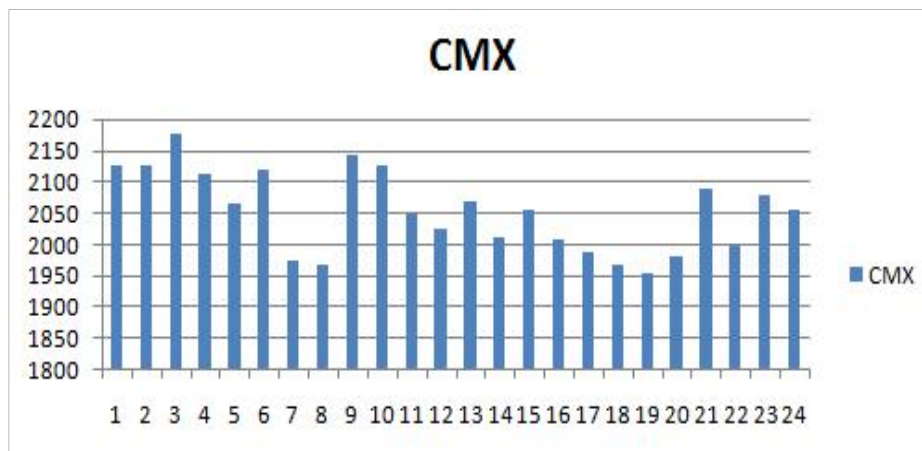
발생날짜	발생시각	최대값시각	종료시각	규모	흑점(발생위치)
01-Jan-14	6:45	6:49	6:52	C2.1	11944
01-Jan-14	7:21	7:26	7:29	C3.2	11940(S12W47)
01-Jan-14	15:40	15:48	16:09	C6.5	11944
01-Jan-14	18:40	18:52	19:03	M9.9	11936(S14W47)
02-Jan-14	2:24	2:33	2:56	M1.7	11944(S05E76)
02-Jan-14	4:25	4:29	4:32	C5.3	11944
02-Jan-14	7:43	7:49	7:51	C4.9	11944(S05E76)
02-Jan-14	11:25	12:26	12:42	C9.5	11944
02-Jan-14	20:30	20:38	20:55	C3.4	11944(S03E68)
02-Jan-14	21:41	21:46	21:50	C3.1	11944(S05E72)
02-Jan-14	22:12	22:18	22:22	M1.2	11944(S05E72)
02-Jan-14	23:37	23:43	23:51	C2.5	11936
03-Jan-14	2:48	2:52	2:55	C2.4	11944
03-Jan-14	3:56	4:01	4:07	C4.6	11944(S06E60)
03-Jan-14	6:29	7:00	7:18	C3.0	11944(S06E63)
03-Jan-14	8:12	8:18	8:30	C3.6	11944(S05E57)
03-Jan-14	10:07	10:15	10:19	C3.3	11944(S05E56)
03-Jan-14	10:37	10:42	10:45	C5.9	11944(S05E55)
03-Jan-14	11:40	11:44	11:49	C1.9	11944
03-Jan-14	12:41	12:50	12:54	M1.0	11944
03-Jan-14	15:05	15:35	16:05	C6.9	11944
03-Jan-14	18:30	18:35	18:40	C4.0	11937(S11W41)
03-Jan-14	21:09	21:14	21:19	M1.1	11944(S06E56)
04-Jan-14	2:37	2:43	2:51	C3.6	11944
04-Jan-14	6:22	6:40	7:10	C5.6	11944(S05E52)
04-Jan-14	9:48	9:51	10:03	C2.9	11944(S06E49)]
04-Jan-14	10:16	10:25	10:41	M1.3	11944(S05E48)
04-Jan-14	15:33	15:41	15:47	C9.4	11944
04-Jan-14	18:47	19:46	20:23	M4.0	
04-Jan-14	22:12	22:52	23:22	M1.9	11936
05-Jan-14	2:24	2:28	2:30	C4.5	11944(S15E45)

[표 3] 2014년 1월에 발생한 태양흑점폭발 발생 목록



[그림 24] 연도별 태양흑점폭발 발생 횟수

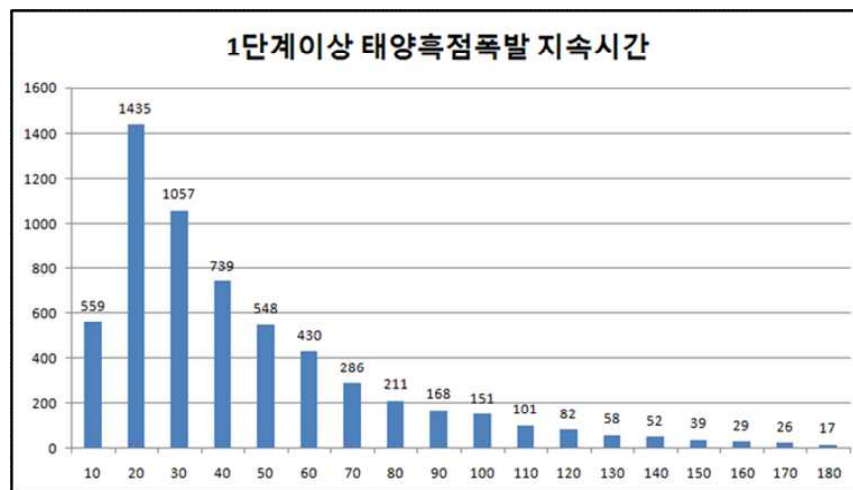
지난 40년간(1975~2014년) C급 규모 이상의 흑점폭발은 49,265회가 발생하였으며, 연평균 1,232회가 발생하였다. 태양흑점폭발의 발생 빈도는 태양활동 주기와 동일한 경향을 보였으며, 1989년에 가장 활발한 태양활동을 보인 것으로 분석된다. 또한 극대기에 발생한 태양흑점폭발의 횟수가 점차 줄어들고 있는 것이 확인 되었으며, 이는 태양활동이 점차 약해지고 있는 것으로 분석된다.



[그림 25] 태양흑점폭발의 시간대별 발생 현황(C급 이상)

단파통신에 영향을 미치는 주간 시간(9 ~ 18 KST)에 발생한 흑점폭발은






전체 흑점폭발 중 18,474회로 37%의 비율을 보였으며, 이는 시간대에 따른 흑점폭발발생 빈도의 의존성은 없는 것으로 분석되었다. 또한, 태양흑점 폭발 1단계 경보를 발생시키는 M급 이상의 폭발은 총 6,108회 발생하였고, 연 평균 153회 발생하였다. 3단계 이상 경보를 발생시키는 X급 폭발은 총 431회 발생하였고, 연 평균 11회 발생한 것으로 조사되었다. 그리고 낮 시간(9:00~18:00)에 발생한 1단계 이상 태양흑점폭발은 평균 지속시간은 30분, 연평균 57회 발생하였고, 3단계 이상은 태양흑점폭발은 평균 지속시간은 48분으로 연평균 4회 발생하였다.



[그림 26] 1단계 이상 태양흑점폭발의 지속시간

델린저 현상은 1단계 이상의 태양흑점폭발 발생 시에 신호 감쇄 현상이 발생하며, 3단계 이상일 경우 통신이 두절되거나 수 시간 동안 신호 감쇄현상이 나타나는 것으로 알려져 있다. 지난 40년간 1단계 이상 태양흑점폭발의 평균 지속시간은 30분이었으며, 3단계 이상 태양흑점폭발은 평균 48분 동안 지속되는 것으로 분석되었다. 현재 국립전파연구원은 15분 간격으로 전리권 직업사 관측을 수행하고 있어, 실제 순간적으로 발생하는 태양흑점폭발에 의한 단파통신 장애 상황 대응이 다소 어려울 것으로 판단된다. 하지만 3단계 이상의 흑점 폭발이나 장시간 동안 지속되는 흑점폭발에 의해 대규모의 델린저 현상이 발생하므로 이에 대한 대응은 가능할 것으로 분석된다.

●● 단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련

등급		예상되는 피해	관측값 *	평균발생횟수
R1		<ul style="list-style-type: none"> HF 통신 : 낮지역에서 HF 통신에 약한 장애가 발생하며 가끔씩 신호감쇄 현상이 나타남 항법시스템 : 저주파 항법신호의 강도가 짧은 기간동안 약해짐 	10^{-5}	태양활동 1주기 당(11년) 약 2000회
R2		<ul style="list-style-type: none"> HF 통신 : 낮지역에서 제한적으로 HF 통신이 두절되거나 수 심분 동안 신호감쇄현상이 나타남 항법시스템 : 수 심분 동안 저주파 항법신호의 강도가 약해짐 	5×10^{-6}	태양활동 1주기 당(11년) 약 350회
R3		<ul style="list-style-type: none"> HF 통신 : 낮지역에서 HF 통신이 두절되거나 수 시간 동안 신호감쇄현상이 나타남 항법시스템 : 수 심분 동안 저주파 항법신호의 강도가 약해짐 	10^{-4}	태양활동 1주기 당(11년) 약 175회
R4		<ul style="list-style-type: none"> HF 통신 : 낮시간 광범위한 지역에 걸쳐 수 시간동안 HF 통신두절이 나타날 수 있음 항법시스템 : 수 시간동안 항법데이터에 오류가 증가하여 저주파 항법 시스템이 두절될 수 있음 	10^{-3}	태양활동 1주기 당(11년) 약 8회
R5		<ul style="list-style-type: none"> HF 통신 : 상당한 시간 낮지역에서 HF 통신 두절 발생(항공 및 해상 항해 시 HF 통신 불가) 항법시스템 : 수 시간 동안 저주파 항법시스템이 두절될 수 있으며, GPS 위성 신호의 오류증가로 밤지역까지 항법시스템 두절 현상이 영향을 줄 수 있음 	2×10^{-3}	태양활동 1주기 당(11년) 약 1회

[표 4] 태양흑점폭발에 의해 예상되는 피해 및 평균 발생횟수

제4절 지자기교란에 따른 단파통신 장애

지구자기장의 변화는 지구 내부의 변화에 의해 오랜 기간을 주기로 천천히 변화하는 영년변화, 태양에서 오는 자외선, X선 등의 복사로 인해 형성된 외부자기장이 낮 지역과 밤 지역의 자기장의 세기가 다르기 때문에 발생하는 것으로 하루를 주기로 변화하는 일변화, 태양에서 발생한 급격한 현상으로 인해 갑작스럽게 변화하는 지자기교란 등이 있다. 이러한 지자기 변화는 평상시 지구자기장에 의해 차단되었던 고에너지의 하전입자들이 지구에 유입되어 인공위성, 통신, 송전설비 등에 문제를 일으키는 등 우리 경제, 사회에 막대한 피해를 입히게 된다.

지자기교란은 중위도와 고위도에서 전리권의 전자밀도를 광범위하게 변화시킨다. 지자기교란에 의해 발생하는 전리권교란은 지자기교란과 같이 발생하며, 지자기 교란이 사라진 후에도 일정 시간 지속된다. 특히, 지자기 교란의 시작으로부터 오로라 지역에서는 약 10분 후, 중위도의 저녁 시간대에서는 6 ~ 12시간 후에 전리권 교란이 시작되어, 짧게는 하루 동안 지속되며 길게는 한 달 간 지속되기도 한다. 또한, 전리권교란 자체는 전리권 전체에 걸쳐 영향을 주지만 HF 통신에 영향을 주는 것은 전리권의 저고도에서 발생하는 교란이 영향을 미친다.

낮은 고도 전반에 걸친 밀도 변화는 전리권교란이 시작되면 바로 나타나고 지자기교란이 멈춘 이후에도 오래 지속되는데 이 때 밀도가 증가하는 것을 양전리권 폭풍효과라 부르고 밀도가 감소하는 것을 음전리권 폭풍효과라 부른다. 전리권교란동안 대기시스템에서의 대규모 변동과 고층대기에서의 성분, 온도의 변화는 전리권의 급격한 변동의 원인이 되며, 양전리권 폭풍은 적도방향 중성바람에 의한 극지방 전자밀도가 중위도로 이동하며 발생한 것으로 알려져 있으며 음전리권 폭풍은 F2 층 고도의 O/N₂ 증가에 의한 전자소멸로 전자밀도가 낮아지는 것으로 알려져 있다. 양전리권, 음전리권 폭풍효과는 폭풍 현상에 따라 매우 복잡하며 다양하다. 이러한 복잡한 변화를 만들어내는 동적과정은 아직 잘 이해되고 있지 않지만 현재 이론적, 관측적 연구가 활발히 진행되고 있다.

전리권을 이용하여 반사되던 전파는 전리권의 밀도가 감소되면 전리권을 뚫고 통과해 나가기 때문에 전리권 밀도 감소는 전파통신 장애의 주원인이 된다. 최대 가용주파수(MUF)는 전리권교란 동안 1/2배 정도 감소하기도 한다. 이러한 교란현상은 고위도의 경우 더욱 심각하다. 전리권 교란에 의한 전리권의 심각한 밀도 감소는 하루 혹은 그 이상 지속될 수 있다.

지자기교란 정도를 판단하기 위해 사용하는 지수를 국제 지자기교란 지수라 (Kp 지수)하며, 1939년 Bartels이 태양입자에 의한 지구 영향을 연속적으로 모니터하기 위하여 지자기변화 정도를 0 ~ 9 사이 값으로 분류한 값이다. 각 지자기 관측소의 K 지수는 세계시를 기준으로 0시부터 매 3시간 동안의 지자기 변화량 중 수평 성분의 변화량 중 큰 쪽을 택하여 결정된 값을 미리 설정된 준대수 척도와 비교하여 0에서 9 사이의 값을 부여한다.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Honolulu	0	3	6	12	24	40	70	120	200	300
Godhavn	0	15	30	60	120	210	360	60	1000	1500

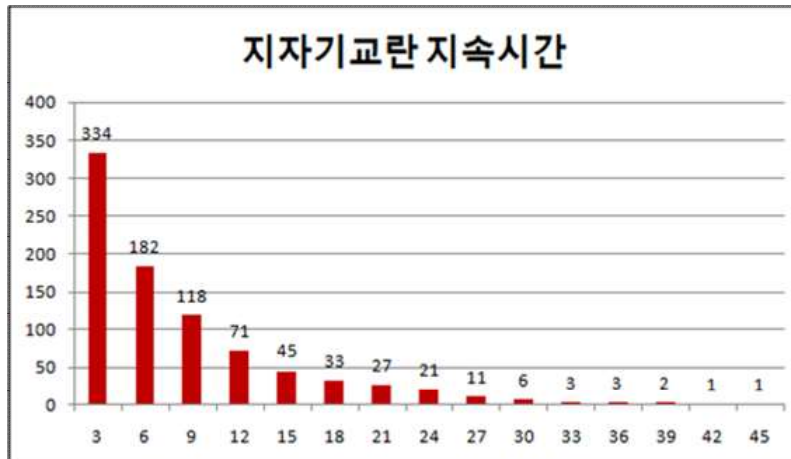
[표 5] Honolulu와 Godhavn의 K 지수 분류



[그림 27] 연도별 지자기교란 발생 횟수

지자기교란에 의한 전리권교란 빈도수를 확인하기 위하여 교토대학에서

제공하는 지난 1996년부터 2013년까지 18년간 관측된 국제 지자기교란 지수를 분석하였다. 지난 18년간 1단계 이상의 지자기교란은 1,594회 발생하였으며, 연평균 59회가 발생하였다. 이 결과는 태양흑점폭발이 연평균 153회 발생한 것에 비해 비교적 높은 수치인데, 이는 통계 자료가 태양활동 극대기가 2회 포함되고 극소기가 1회 포함되어 평균값이 증가된 것으로 볼 수 있다. 지자기교란의 발생 빈도는 태양활동이 가장 활발하였던 2001년에 비해 2003년에 가장 많은 지자기교란이 발생하였으나, 전체적인 빈도수는 비슷한 수준을 보였다. 3단계 이상 지자기교란은 총 138회 발생하였고, 연 평균 8회 발생한 것으로 조사되었다. 1단계 이상 지자기교란의 평균 지속시간은 약 6시간으로 조사되었다.



[그림 28] 1단계 이상 지자기교란의 지속시간

지자기교란에 의한 전리권교란은 2단계 이상의 지자기교란 발생 시에 고위도의 단파통신에 장애가 발생될 수 있으며, 3단계 이상일 경우 중위도 단파통신에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 지난 18년간 1단계 이상 태양흑점폭발의 평균 지속시간은 6시간 지속되는 것으로 분석되었으며, 15분 간격의 전리권 직업사 관측자료를 이용한 단파통신 장애 상황 알림 서비스를 적용하기에 충분한 시간으로 분석된다.

●● 단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련

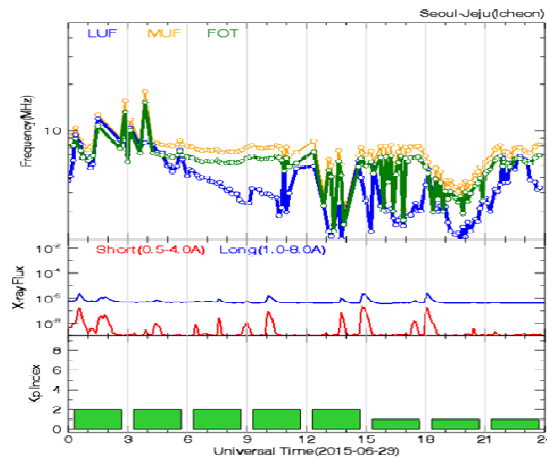
등급		예상되는 피해	관측 값*	평균발생횟수
G1		<ul style="list-style-type: none"> 전력시스템 : 약한 전력망 동요현상이 일어날 수 있음 위성시스템 : 기능 및 운용에 약한 장애 발생가능 기타 : 계절에 따라 이주하는 동물의 항법기능에 영향을 줄 수 있음 	Kp=5	태양활동 1주기 당(11년) 약 1700회
G2		<ul style="list-style-type: none"> 전력시스템 : 고위도지역 전력시스템에 전압 불안정 현상이 나타날 수 있으며 장시간 지속될 경우 변압기 손상이 있을 수 있음 위성시스템 : 지상관제소에서는 위성의 자세보정 또는 궤도수정이 필요할 수 있고 끌림현상 발생 가능 기타 : 고위도에서는 HF통신 장애가 발생할 수 있음 	Kp=6	태양활동 1주기 당(11년) 약 600회
G3		<ul style="list-style-type: none"> 전력시스템 : 전압보정이 필요할 수 있으며, 일부 보호시스템에 오작동 발생 가능 위성시스템 : 인공위성에 표면전하현상이 발생할 수 있으며 저궤도위성의 경우 끌림현상이 증가하므로 자세보정이 필요할 수 있음 기타 : 위성 항법시스템, 저주파 항법시스템 및 HF 통신에 간헐적으로 문제가 발생할 수 있음 	Kp=7	태양활동 1주기 당(11년) 약 200회
G4		<ul style="list-style-type: none"> 전력시스템 : 전압제어 문제의 광범위한 확산 및 일부 보호시스템의 오작동으로 주요 전력망 기능이 상실됨 위성시스템 : 인공위성에 표면전하현상 및 위성추적에 문제 발생 가능하며, 위성자세 제어가 필요할 수 있음 기타 : 송유관에 수시간 동안 유도전류가 발생하여 제어 및 보호시스템에 문제가 발생하며, HF 통신, 위성항법시스템, 저주파 항법에 장애가 발생할 수 있음 	Kp=8	태양활동 1주기 당(11년) 약 100회
G5		<ul style="list-style-type: none"> 전력시스템 : 광범위한 지역에 걸쳐 전압에 문제가 발생할 수 있으며, 일부 시스템에서는 오작동으로 전력망의 전력 전송체계가 완전히 훼손되고, 변압기가 파손될 수 있음 위성시스템 : 인공위성에 표면전하현상, 위성추적 및 상/하향 링크에 문제가 발생할 수 있음 기타 : 송유관 보호장비에 수백 암페어의 유도전류가 발생할 수 있으며, 광범위한 지역에 HF 통신, 위성항법시스템, 저주파 항법시스템 장애가 수일동안 발생 가능 	Kp=9	태양활동 1주기 당(11년) 약 4회

[표 6] 지자기교란에 의해 예상되는 피해 및 평균 발생횟수

제4장 단파통신 장애 알림서비스

제1절 단파통신 장애 알림 서비스 개요

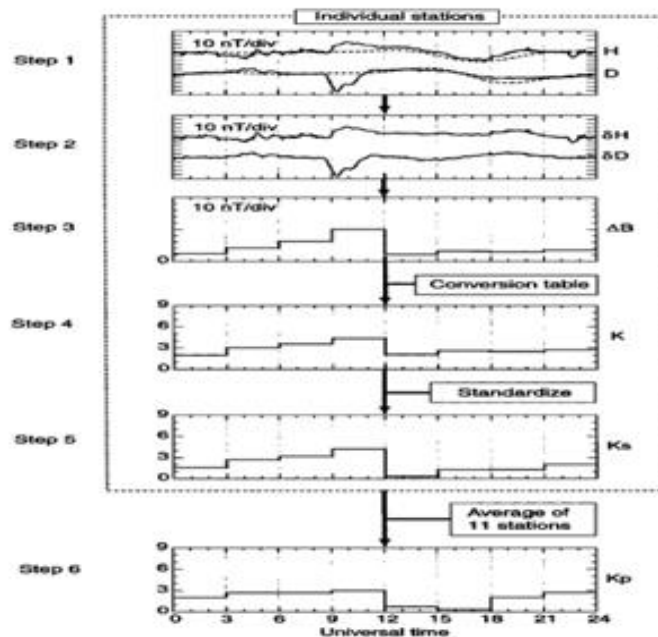
단파통신의 최대가용주파수 및 최소가용주파수를 결정하는데 사용되는 전리권의 특성은 F2층의 임계주파수인 foF2, F2층의 높이인 hmF2, 송수신간의 거리 d, 최소주파수 fmin값에 의해 결정된다. 이 중에서도, foF2는 대표적인 전리권 상태를 표현하는 지수이며, foF2의 변화에 따라 최대가용주파수가 변화하므로 foF2의 변화는 단파통신 상태를 결정하는 매우 중요한 요소이다.



[그림 29] 단파통신 가용주파수(LUF, MUF, FOT)

foF2 관측 자료를 얻기 위해 국립전파연구원 우주전파센터 관측 데이터 서비스에서 제공하고 있는 전리층 관측 자료를 이용하였다. 이천 관측소는 2010년부터 현재까지 자료를 제공하고 있으며, 관측소의 위치는 N37.14°, E127.54°에 위치하고 있다. 제주 관측소는 1998년부터 현재까지 자료를 제공하고 있으며, 관측소의 위치는 N33.43°, E126.30° 이다. 두 관측소 모두 관측기의 모델은 DPS-4D 이며, 7분 30초 간격으로 직입사와 사입사 자료를 번갈아 제공하며 이번 연구에서는 0, 15, 30, 45분 간격의 직입사 자료만을 이용하였다.

foF2의 변화 정도를 산출하기 위해서 먼저 최근 전리권의 foF2 평균값을 추출하기 위해 지난 7일간 관측된 이천과 제주의 foF2 값의 시간대별 중간값, 즉 전리권이 조용한 날(Quiet Day Curve)을 선정하였다. 중간값(median)이 아니라 평균값(Average)를 선택할 경우 7일 중 하루 값이 교란의 발생 또는 관측 장비의 오류로 인하여 비정상적으로 높은 값을 가지거나 낮은 값을 가질 때 전체적인 평균값이 높아지거나 낮아지므로 이러한 특이점을 제거하기 위해 중간값을 이용하여 전리권의 조용한 날들의 foF2 값을 선택하게 된다. 또한 7일의 관측 자료 기간은 전리권의 일변화, 계절변화, 태양주기에 따른 변화와 같은 주기적인 변화에 의한 효과들을 제거할 수 있게 해준다. 하지만 7일간 지속적인 전리권 교란이 발생할 경우 QDC 곡선의 값이 불안정할 수 있어 이는 추후 전리권 모델 추출값을 이용하여 해결할 수 있을 것으로 보인다.



[그림 30] Kp 지수 산출 방법

현재 관측된 foF2 값과 QDC값의 차이에 따른 foF2 변화량을 시계열로 산출한다. 전리권의 전자 밀도가 증가하는 양전리권 폭풍이 발생할 경우 foF2의 값은 증가되어 높은 주파수를 이용한 통신이 가능하나, hmF2의 고도 변화에 따른 실제 단파가 반사되는 높이가 변해 이에 따른 일부 지역간 통신 장애가 발생할

수 있다. 밀도가 감소하는 음전리권 폭풍이 발생할 경우 foF2의 값은 감소하여 MUF 부근의 주파수들은 통신에 문제가 생길 수 있다. 이러한 QDC와 실시간 관측값의 변화의 차이를 이용한 방법으로 Kp 지수 산출 방법이 있다.

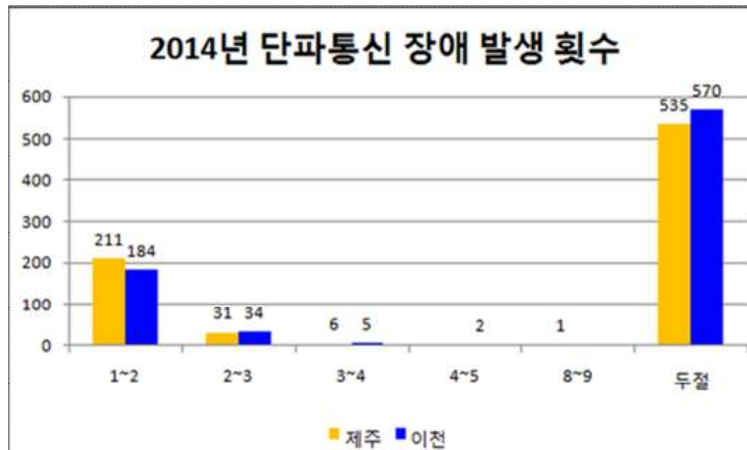
이번 연구에서는 양전리권 폭풍과 음전리권 폭풍에 따른 foF2의 변화값을 모두 반영하여 통계 연구를 수행하였다. 그리고 이에 따른 통계 결과에 따라 단파통신의 변화가 발생할 수 있는 관심단계, 비교적 큰 규모의 가용주파수가 변화할 수 있는 주의단계, 단파통신이 불가능한 상태인 두절단계로 구분하여 알림 서비스를 제공하고자 한다.

구분	관심	주의	두절
foF2 변화량	$\pm 1 \sim 2$ MHz	$\pm 2 \sim 5$ MHz	foF2 관측 불가

[표 7] foF2 변화량에 따른 단파통신 장애 분류

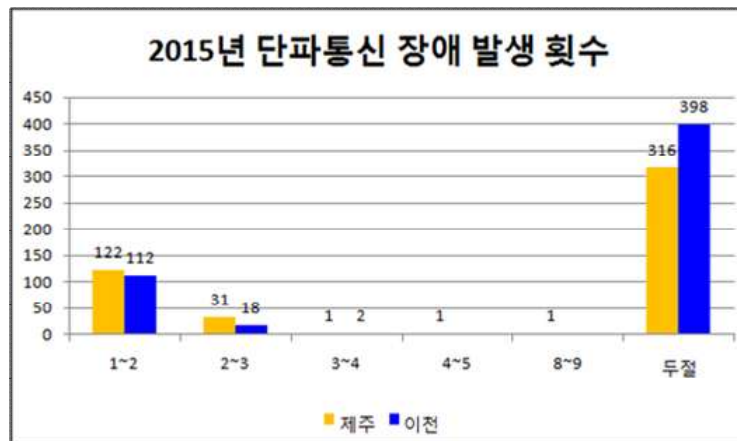
제2절 단파통신 장애 분석 및 알림 방안

foF2 관측값을 이용한 단파통신 장애 알림 방안을 이용하여 2014년 1월부터 2015년 6월까지 이천과 제주 관측소에서 관측된 foF2 관측값을 분석하였다.



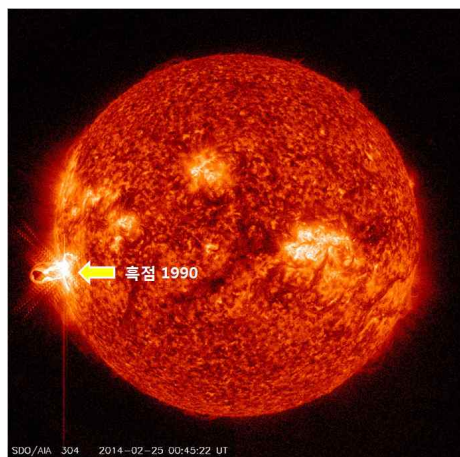
[그림 31] 2014년 단파통신 장애 발생 횟수(이천, 제주)

2014년 제주와 이천 관측소 자료에 의하면 foF2와 QDC값의 차이가 관심 단계인 1~2MHz는 각각 211회와 184회, 주의단계인 2~3MHz는 31회와 34회, 3~4MHz는 6회와 5회 발생하였다. 이천에서는 4~5MHz의 차이가 2회 발생하였으며, 제주에서는 8~9MHz의 차이가 1회 발생하였다. foF2 값이 관측되지 않는 단파통신 두절 상태는 각각 535회와 570회가 발생하였다. 이러한 발생 횟수는 태양흑점폭발 연평균 발생 횟수가 153회, 지자기교란 59회에 비해 높은 수치이다. 그 원인은 2014년이 태양활동 극대기로서 평균보다 잦은 태양흑점폭발(221회)이 발생하였으며, 15분 이상 단파통신 두절이 발생한 경우 발생 횟수를 15분마다 1회씩 더하여 발생 횟수가 높게 산정되었다. 또한 이천이 제주보다 단파통신 두절이 더 많이 발생한 것으로 분석되는데, 이는 이천(N37.14°)이 제주(N33.43°)보다 지자기위도가 3.71° 높아 지자기교란에 따른 전리권교란현상에 더 크게 영향을 받은 것으로 분석된다.

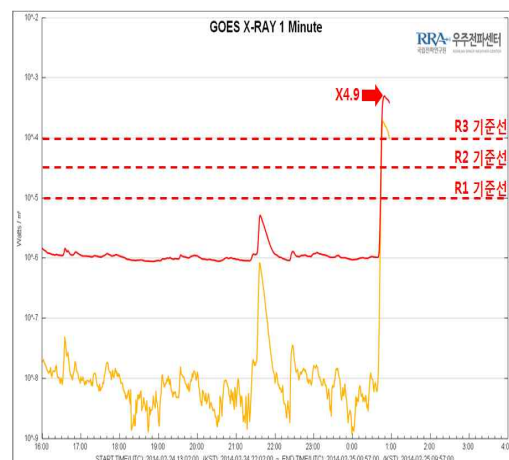


[그림 32] 2015년 1월~6월 단파통신 장애 발생 횟수(이전, 제주)

2015년 단파통신 장애 발생 횟수도 2014년과 비슷한 양상을 보인다. 제주와 이전 관측소 자료에 의하면 foF2와 QDC값의 차이가 관심단계인 1~2MHz는 각각 122회와 112회, 주의단계인 2~3MHz는 31회와 18회, 3~4MHz는 1회와 2회 발생하였다. 제주에서는 4~5MHz의 차이가 1회 발생하였으며, 8~9MHz의 차이도 1회 발생하였다. 그리고 foF2 값이 관측되지 않는 단파통신 두절 상태는 각각 316회와 398회가 발생하였다.

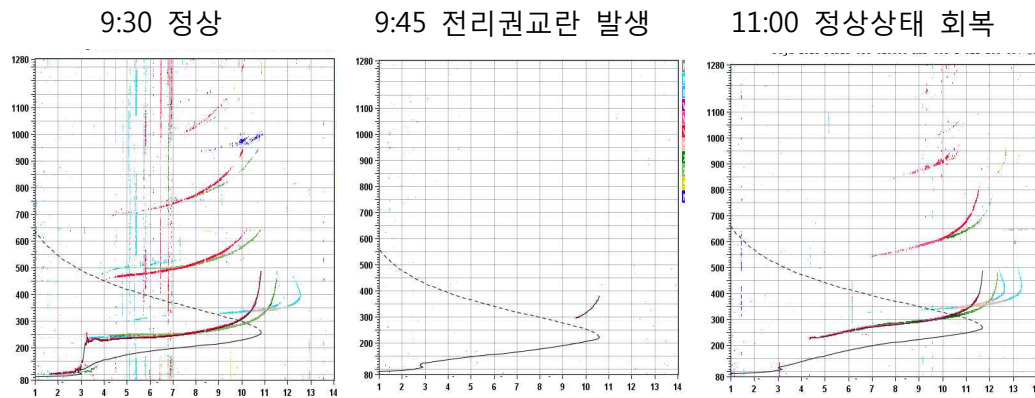


[그림 33] SDO 위성(미국 NASA의 정지궤도위성)의 태양흑점 폭발 순간의 모습

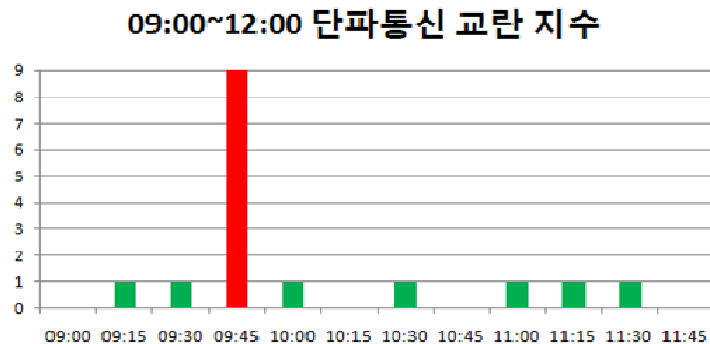


[그림 34] GOES 위성(미국 NOAA의 정지궤도 위성)에서 관측한 태양 X선 자료

실제 태양흑점폭발과 지자기교란 상황에 따른 단파통신 장애 상황을 분석하고 단파통신 장애 알림과 해제를 모의 실험하였다. 먼저, 2014년 2월 25일 화요일 오전 9시 45분에 발생한 X4.9 규모의 태양흑점폭발 3단계 상황에 따른 전리권 상태를 분석하였다. 이번 태양흑점폭발은 흑점 1990(S15E77)에서 발생하였으며, 흑점 1990은 오전 9시 45분에 3단계 상황 발생 이후 10시 15분에 2단계로, 10시 26분에 1단계로 점차 약화되었다. 이번 태양흑점폭발로 인해 전리권은 일시적으로 교란되어 약 15분 가량 단파통신이 두절되었다.



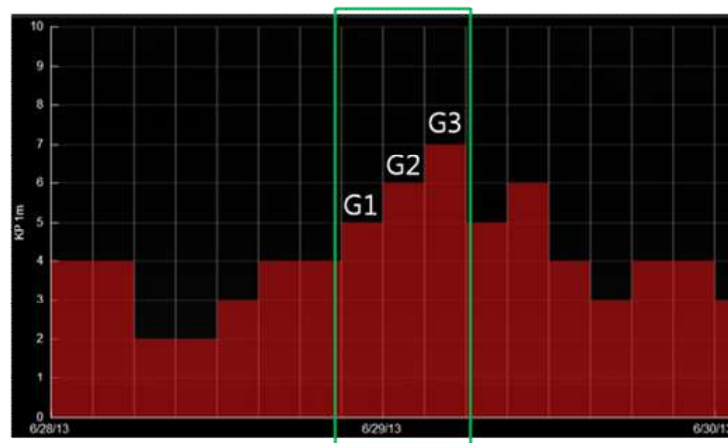
[그림 35] 태양흑점폭발 전후 국내(제주) 전리권 관측 자료



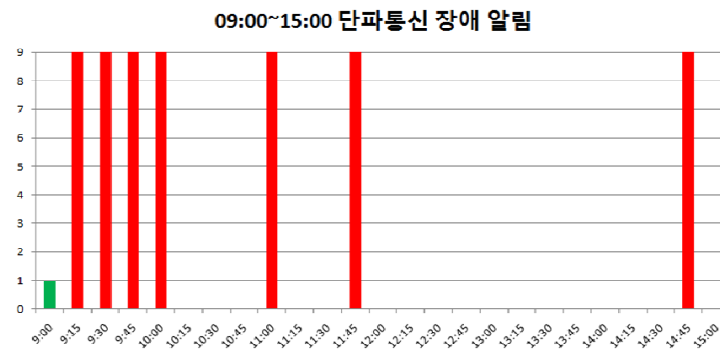
[그림 36] 전리권 교란에 따른 foF2 관측값(제주)과 QDC 값의 차이

foF2의 변화량에 따라 3단계 태양흑점폭발이 발생한 9:45분경에 foF2 변화값은 9 이상으로써 단파통신 장애 알림 상황이 발생하였으며, 이후 전리권은 빠르게 안정된 상태로 회복되어 추가적인 단파통신 두절 상황은 발생하지 않고 10:00에 상황 해제 상태가 되었다.

다음은, 2013년 6월 29일 토요일 오후 3시에 발생한 지자기교란 3단계 상황에 따른 전리권 상태를 분석하였다. 이번 지자기교란은 6월 25일 18:00 경에 태양 전면의 필라멘트 분출에 따른 코로나물질에 의해 발생하였다. 흑점 1990은 오전 9시 45분에 3단계 상황 발생 이후 10시 15분에 2단계로, 10시 26분에 1단계로 점차 약화되었다. 이번 지자기교란으로 인해 이천관측소 상공의 전리권은 9:15~10:00, 11:00, 11:45, 14:45에 걸쳐 단파통신이 두절되었다.



[그림 37] 지자기교란에 따른 국제 지구자기장 교란지수(Kp) 현황



[그림 38] 전리권 교란에 따른 foF2 관측값(이천)과 QDC 값의 차이

제5장 결론

본 연구에서는 태양활동에 의한 전리권 교란에 따라 단파통신 장애가 발생할 경우 선박 및 항공기의 위치보고 및 긴급 보고 불능 등의 사회 전반적인 피해들을 완화하기 위한 단파통신 장애 알림 서비스 실시 방안에 대해 연구하였다.

연구 결과는 첫째, 태양흑점폭발과 지자기교란에 의해 발생하는 일시적인 단파통신 두절의 지속 가능시간을 조사하였다. 태양흑점폭발은 지난 40년간 관측된 태양흑점 폭발 기록을 분석하였으며, 낮 시간에 발생한 1단계 이상 폭발은 연평균 30분의 지속시간으로 57회 발생하였으며, 3단계 이상 폭발은 연평균 약 48분간의 지속시간으로 4회 발생한 것으로 분석되었다. 그리고 지자기교란은 지난 18년간 관측된 국제 지구장기장 교란지수(Kp)값을 분석하였으며, 1단계 이상의 지자기교란은 연평균 59회, 약 6시간 지속된 것으로 조사되었다. 현재 국립전파연구원의 전리권 관측기는 15분 간격으로 직업사 관측을 수행하고 있어, 실제 순간적으로 발생하는 태양흑점폭발에 의한 단파통신 장애 상황을 전파하기에는 다소 어려울 것으로 판단된다. 하지만 3단계 이상의 흑점폭발이나 지자기교란에 의한 단파통신 두절 대응은 가능할 것으로 판단된다.

둘째, 이천과 제주의 전리권 관측 자료를 분석하고, 이를 이용한 단파통신 장애 알림 서비스 실시 방안을 제시하였다. 전리권 F2 층의 임계주파수인 foF2는 대표적인 전리권 상태를 표현하는 지수이며, foF2의 변화에 따라 최대 가용주파수가 변화하므로 foF2값을 분석하여 전리권 상태 파악이 가능하다. 태양흑점폭발이나 지자기교란에 의한 전리권교란이 발생할 경우 중위도에서는 전리권의 전자 밀도가 증가하는 양전리권 폭풍이나 밀도가 감소하는 음전리권 폭풍이 발생하여 단파 통신에 문제가 생길 수 있다. 이러한 전리권교란에 의한 단파통신 장애를 분석하기 위해 2014년 1월부터 2015년 6월까지 이천과 제주의 전리권 관측기의 자료를 분석하였다. 이에 따라 foF2 값이 1~2MHz 변하는 경우 관심단계, 2~5MHz 변하는 경우 주의단계, 단파통신이 불가능한 두절단계로 나누어 단파통신 장애 분류표에 따른 분석을 실시하였다. 이천과 제주에서 발생한 단파통신 주의는 연 67회 관측되었으며, 단파통신 두절은 연 606회 관측되었다. 2014~2015년이 태양활동 극대기로서 평균보다 잦은 태양흑점폭발이 발생하였고, 연속적인 단파통신 두절 상태를 구분하지 않아

비교적 높은 횡수가 발생한 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해 마련된 단파통신 장애 알림서비스 방안을 이용하여 차후 상황 알림서비스를 개발하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다. foF2는 최대가용주파수를 결정하는데 영향을 미치므로 최소가용주파수를 결정하는 전리권 최소주파수 또는 스포라딕 E층에 의한 최소주파수를 추후 반영하여야 할 것이다. 그리고 추후 시간분해능이 높은 관측기를 활용하여 실시간으로 발생하는 단파통신 두절을 분석하고 대응할 필요성이 있다.

이번 연구 결과는 추후 단파통신 수요자들을 위한 맞춤형 서비스로 활용 가능하며, 우주전파재난 대응 강화를 위한 전리권교란 상황 알림서비스로 확대할 수 있을 것이다. 그리고 태양 및 지구 자기장 분석 자료는 태양흑점폭발 및 지자기교란 분석 연구에 활용하여 우주환경 예보 역량 강화에도 활용할 계획이다.

[참고문헌]

- [1] 국립전파연구원, 전리권 영향분석 및 예측모델 개발에 관한 연구, 2013
- [2] 국립전파연구원, 중단거리 전파예보시스템 개선방안 연구, 2002
- [3] 백승복, HF 도약지대에서의 전리권 수직 반사파(NVIS) 통신 시스템의 성능 분석, 2012
- [4] 국립전파연구원, 전리권 및 자기권의 변화가 전파통신에 미치는 영향, 1992
- [5] 국립전파연구원, 전파예보 서비스 개선 연구, 2005
- [6] 국립전파연구원, 국제표준 전리층 최신모델 검증 및 국내 적용기준 마련 연구
- [7] P. V. Kishcha, Indices and updating procedures for modelling of ionospheric disturbances, Adv. Space Res, 1995
- [8] T. L. Gulyaeva, Indices of geomagnetic variations and ionospheric disturbances, Adv. Space Res, 1993
- [9] Zhou Chen et al., A new pair of indices to describe the relationship between ionospheric disturbances and geomagnetic activity, JGR, 2014
- [10] M. Pezzopane et al., Assimilation of autoscaled data and regional and local ionospheric models as input sources for real-time 3-D International Reference Ionosphere modeling, Radio Science, 46, RS5009
- [11] I. A. Galkin et al., Assimilation of GIRO data into a real-time IRI, Radio Science, 47, RS0L07

단파통신 장애 알림서비스 실시 방안 마련



58217 전남 나주시 빛가람로 767 (빛가람동)

발 행 일 : 2015. 12.

발 행 인 : 유 대 선

발 행 처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4416

인 쇄 : (사)한국척수장애인협회 광주·전남인쇄사업소

Tel. 062) 222-2788

ISBN : 979-11-5820-039-8 < 비 매 품 >

주 의

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

