

제 출 문

우주전파환경 예보정확도 개선 및 결과 비교평가 연구

본 보고서를 「우주전파환경 예보정확도 개선 및 결과 비교평가 연구」 과제의 보고서로 제출합니다.

2013. 12. 31.

2013. 12.

요 약 문

국립전파연구원(RRA) 우주전파센터(KSWC)는 대한민국의 우주전파환경 예·경보와 국제우주환경서비스(ISES)의 지역경보센터를 담당하고 있는 국가기관이다. 2012년 3월부터 공식적으로 태양과 지자기 현상에 대한 예보를 시작하였으며, 이러한 예보 자료를 통신, 위성 관제, 항공, 전력, GPS, 국방 분야 등 중요 국가 사회 기반 시설 보호에 필수적인 다수의 정부 기관이나 민간 조직에 제공하고 있다.

이번 연구에서는 우주전파센터 예보 서비스의 질적 향상을 위하여 전파 두절 예보를 위한 플레어 발생 확률을 계산하여 예보관에게 정확한 통계 참고 정보를 제공할 수 있는 새로운 태양 플레어 예보 도구를 개발하였다. 또한 예보 검증 연구를 수행하였고, 국제우주환경서비스(ISES)의 국제 정보 기구인 미국해양대기관리청(NOAA)의 우주환경예보센터(SWPC)와 예보 정확도를 비교하였다.

태양 플레어 예보는 우주전파환경 연구의 핵심 분야이며, 이에 대한 다양한 방법이 개발되어져 왔다. 하지만, 국제우주환경서비스(ISES) 지역경보센터(RWCs)의 대다수가 여전히 예보관의 판단에 의해 만들어진 경험 법칙에 의한 전통적인 태양 예보 방법에 의지하고 있다. 예보관의 판단은 예보관의 전문 지식에 의존하고 있으며 통계적으로 정량화되지 않았기 때문에, 이것은 분명히 다소 주관적이게 된다. 그리하여, 여러 태양흑점의 특징(McIntosh 분류, Mt.Wilson 자기 분류, 태양흑점 크기와 이전의 플레어 활동 등)과 그 변화에 의한 태양 플레어 발생 확률을 객관적으로 연구하였다. 그리고 이러한 연구 결과를 적용하여 태양 플레어 예보 도구를 개발하였다.

SUMMARY

The Korean Space Weather Center (KSWC) of the National Radio Research Agency (RRA) is a national institute which is the official source for space weather forecasts and alerts for Republic of Korea and also a Regional Warning Center of the International Space Environment Service (ISES).

KSWC started to produce daily forecasts of solar and geophysical events officially from March 2012 and has provided them to multiple government and private organizations in the fields of telecommunication, satellite operation, aviation, power grid, GPS navigation and national defense as well, those are essential to safeguarding critical national infrastructures.

In order to improve the quality of KSWC's forecast service, we developed a new solar flare forecast tool that gives a good statistical guidance to forecasters to determine flare probability for Radio Blackout Forecast. We also conducted forecast verification study and made comparison with the forecast accuracy of NOAA Space Weather Prediction Center, the World Warning Agency of ISES.

Solar flare prediction has been at the core of space weather research and a number of different approaches have been developed. However, many of ISES RWCs still rely on the traditional flare prediction method which rules of thumb are incorporated by a human forecaster. That is apparently somewhat subjective, because the forecast decision depends on the expertise of an operator and it has not been evaluated statistically. So, we have investigated solar flare probability depending on several sunspot characteristics (McIntosh classification, Mt. Wilson magnetic classification, sunspot area and previous flare activity) and their changes. We developed a solar flare forecast tool applying the study result. We showed how this new tool works in practice by deploying at KSWC.

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구목적	1
제2장 예보 서비스 개선연구	3
제1절 개 요	3
제2절 전파두절의 예보 서비스 개선연구	4
제3절 태양입자 유입에 대한 예보 서비스 개선연구	8
제4절 지자기 교란에 대한 예보 서비스 개선연구	13
제3장 예보 서비스 품질평가	19
제1절 개 요	19
제2절 예보 서비스 품질평가 방법	21
제3절 예보 서비스 품질평가 결과	32
제4장 결 론	42
참고문헌	44

표 목 차

표 1 최근 3년간 3단계 전파두절 수준의 태양흑점 폭발 횟수	4
표 2 2013년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역	11
표 3 2012년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역	11
표 4 2011년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역	11
표 5 태양활동에 의한 태양방출 물질의 주요 특징	13
표 6 태양활동 각 주기별 3단계 전파두절 경보발령 현황	20
표 7 태양활동 23주기 3단계이상 전파두절 경보발령 현황	20
표 8 2012년 예보 서비스에 대한 품질평가 결과	21
표 9 예보·관측 비교표	23
표 10 기관 1에 대한 예보·관측 비교표	24
표 11 기관 2에 대한 예보·관측 비교표	24
표 12 2012년도 예보 서비스에 대한 일일 확률값 비교 및 예보 효율성 비교	27
표 13 예보·관측 비교방법을 이용한 우주전파센터 예보 서비스 비교	36
표 14 예보 효율성 비교방법을 이용한 우주전파센터 예보 서비스	37
표 15 확장형 예보·관측 비교방법을 이용한 예보 서비스 비교	37

그 립 목 차

그림 1	전리층 관측기 송신안테나	1
그림 2	전리층 관측기 수신안테나	1
그림 3	태양흑점 폭발에 대한 미국(좌), 일본(우)의 예보 서비스 품질평가 자료	2
그림 4	국제 우주전파환경 서비스 기구(ISES) 회원국 현황	3
그림 5	태양흑점 수 증감주기	4
그림 6	태양활동 자동분석 모델에 의한 흑점분석	5
그림 7	흑점의 특성에 따른 태양흑점 폭발 확률 분석	6
그림 8	NASA 우주환경모델링센터의 ASSA모델 설명 홈페이지	7
그림 9	지구 자기장 구조에 따른 고에너지 입자의 극지역 유입 과정	8
그림 10	코로나물질방출의 충격파에 의한 지구 영향 관측 자료	9
그림 11	태양자전에 의한 태양풍의 회전모형	10
그림 12	태양흑점 폭발에 따른 태양입자 유입 예보	12
그림 13	행성간 자기장과 지구 자기장이 재결합으로 이동되는 모습	13
그림 14	태양흑점 폭발 및 코로나물질방출에 따른 지자기 교란 발생 확률	14
그림 15	Enlil 모델의 구조 및 입력데이터 종류	15
그림 16	IPS 관측 방법 및 실제 관측결과	16
그림 17	태양풍의 밀도, 속도, 동압력에 따른 지자기 교란 지수 변화	17
그림 18	태양풍의 밀도, 속도, 동압력에 따른 지자기 교란 발생률	18
그림 19	연도별 태양활동에 따른 흑점수 변화 및 예측	19
그림 20	2012년 우주전파센터와 SWPC의 신뢰도 분석	22
그림 21	2012년 우주전파센터와 SWPC의 예보횟수 현황	22
그림 22	MSE와 VAR에 따른 예보효율성 변화	26
그림 23	예보 효율성을 이용한 미국 SWPC의 예보 서비스 품질평가 자료	28
그림 24	상대평가곡선의 비교평가 방법 예시	29
그림 25	변수가 다수인 예보·관측 비교방법	30
그림 26	예보·관측 비교방법의 샘플데이터 예시	32
그림 27	확장형 예보·관측 비교방법의 예보점수 산출과정	32

그림 28	2012년도 우주전파센터 상대평가 곡선	33
그림 29	2012년도 미국 SWPC 상대평가 곡선	33
그림 30	2013년도 우주전파센터 상대평가 곡선	34
그림 31	2013년도 미국 SWPC 상대평가 곡선	34
그림 32	우주전파센터의 상대평가 곡선 비교	35
그림 33	2012년 KSWC와 SWPC의 예보횟수 비교	38
그림 34	2013년 KSWC와 SWPC의 예보횟수 비교	38
그림 35	태양풍 전달모델(Enlil)에 의한 태양풍 예측	39
그림 36	태양풍 이동모델(IPS)에 의한 태양풍 예측	40
그림 37	일본 NICT에서의 예측에 대한 오차율 평가 자료	40
그림 38	미국 SWPC에서의 예측에 대한 오차율 평가 자료	41

제1장 서론

제1절 연구목적

1967년 국립전파연구원(구전파연구소)는 경기도 이천에서 단파통신 서비스를 위한 전리층 관측을 시작하였는데 이것이 국립전파연구원의 우주전파환경 업무의 시초이다. 이후 단파통신에 영향을 줄 수 있는 전리층 교란이 지자기 교란에 의해 발생될 수 있다는 연구결과에 따라 1975년 이천에는 태양활동에 의한 지구 자기장 교란을 측정하기 위한 관측기를 추가 설치운영하게 된다. 또한 1985년에는 태양에서 방출되는 다양한 주파수 영역에서의 전파를 관측하여 태양활동에 의한 통신 분야의 영향분석 업무도 수행하게 된다. 그리고 우주전파센터에서 공식적인 예보·경보 업무를 실시하기 이전까지 약 46년간 국립전파연구원에서는 이천, 강릉, 제주에서 태양활동과 이에 대한 지구영향을 실시간으로 관측할 수 있는 다양한 관측시설을 갖추게 된다.



그림 1 전리층 관측기 송신안테나



그림 2 전리층 관측기 수신안테나

이렇게 구축된 관측기기는 수십 년간 우주전파환경에 대한 기초 관측 자료를 생성하였고 우주전파센터에서는 이 자료를 활용하여 우주전파환경 예보·경보 업무를 수행할 수 있게 되었다. 이렇게 우주전파센터의 예보·경보 서비스가 공식적으로 실시된 이후 우주전파센터는 국내뿐만 아

니라 해외에서도 대한민국의 대표적 우주전파환경 예보·경보 기관으로 인정받고 있지만 제공되는 서비스에 대한 공식적인 평가 시스템이 없어 예보·경보 서비스의 국제적 수준 비교와 서비스의 향후 발전방향을 제시하기 어려웠다. 미국의 경우 이미 약 20년 전부터 예보·경보 서비스에 대한 품질평가를 실시하여 그 정보를 홈페이지를 통해 공개하고 있다. 일본에서도 자국과 다른 나라들의 예보·경보 서비스 상황을 이용하여 자체적인 품질평가를 실시하고 그 정보를 공개하고 있다.

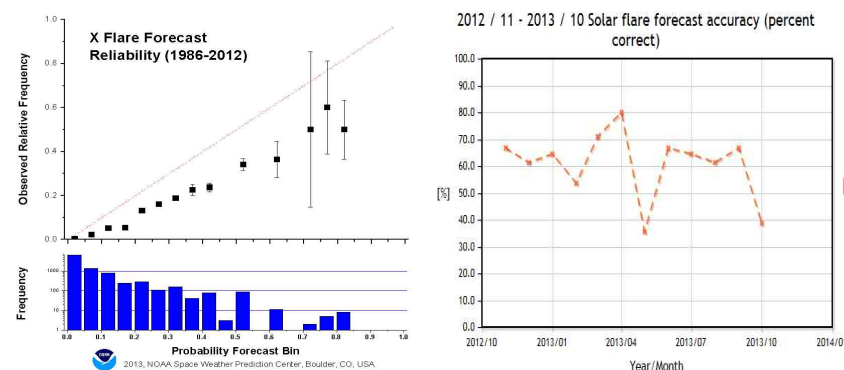


그림 3 태양흑점 폭발에 대한 미국(좌), 일본(우)의 예보 서비스 품질평가 자료

이에 우주전파센터에서는 2012년도 연구에서 센터에서 제공되고 있는 예보·경보 시스템에 대한 품질평가 대상을 선정하고 다양한 평가 방법을 도입하여 평가 방법에 따른 우주전파센터의 예보·경보 서비스 특징을 분석하는데 초점이 맞춰졌다. 올해에는 국민들이 쉽게 이해할 수 있는 수치를 선정하기 위해 서비스 품질평가 방법을 개선하고 품질평가로 나타난 우주전파센터 예보·경보 시스템의 단점을 파악하여 이에 대한 대비책을 마련하는 것이 주요 목적이 된다.

제2장 예보 서비스 개선연구

제1절 개 요

우주전파센터는 지난 2010년 제주에 건립된 이후 꾸준한 관측 자료를 수집하고 분석하여 우주전파환경 예보정보의 기본틀을 마련하게 되었다. 이후 우주전파센터는 우주전파환경 국제기구인 ISES(International Space Environment Service)에 가입하게 된다. ISES는 우주전파환경의 예보 및 경보 업무에 대한 각 국 대표기관들의 모임으로 미국, 호주, 벨기에, 일본, 중국 등 13개국이 등록되어 있으며 우주전파센터는 14번째 가입국으로 지정되어 있다. 우주전파센터 가입이후 오스트리아가 추가로 가입하였으며 2014년에는 영국도 ISES 회원국으로 등록될 예정이다.



그림 4 국제 우주전파환경 서비스 기구(ISES) 회원국 현황

ISES 회원국은 기본적으로 해당 국가에서 발생하는 우주전파환경 변화에 대한 예보 및 경보 업무를 주관하도록 의무가 주어지며 각종 예보 및 경보 서비스에 대한 정확도와 객관성 향상에 노력해야 한다. 이를 위해 ISES 회원국들은 각 국가에서 수집된 다양한 관측자료와 분석기술을 서로 공유하도록 국가간 협의체계가 구성되어 있다. 이와는 별도로 우주전파센터에서는 이러한 국제적인 방향에 맞춰 현재 제공되고 있는 전파두절, 태양입자 유입, 지자기 교란에 대한 예보 서비스 개선연구를 진행하였다.

제2절 전파두절의 예보 서비스 개선연구

전파두절은 태양표면에서 관측되는 흑점활동에 의해 발생된 강한 X선이 지구의 낮지역에 피해를 주는 현상을 말한다. 태양에서 관측되는 흑점들은 태양의 자기장과 고온의 플라즈마가 태양의 자전에 의해 생성되며 기간에 따라 태양의 흑점수는 늘어다 줄었다하는 특징이 나타난다.

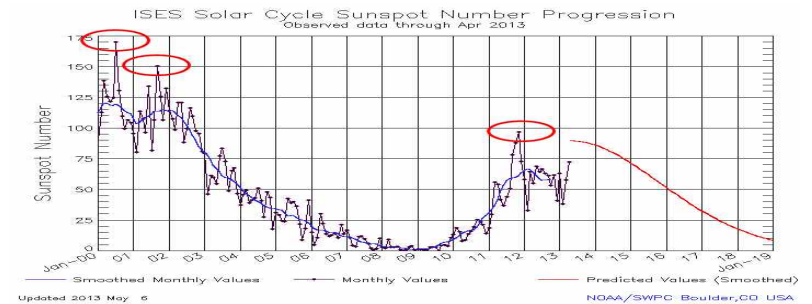


그림 5 태양흑점 수 증감주기

태양 흑점수가 많아지면 태양활동 극대기라 불리며 약 11년 주기성을 가지고 있다. 이 시기에는 흑점의 활동성 매우 높아지면서 흑점에 의한 태양흑점 폭발 현상이 자주 발생한다. 국제 기준에 의해 태양흑점 폭발에 의한 전파두절 경보 발령은 총 5단계로 분류하고 있으며 우주전파센터에서는 3단계 이상의 전파두절 규모의 태양흑점 폭발이 발생하면 보도자료를 배포하고 있다.

표 1. 최근 3년간 3단계 전파두절 수준의 태양흑점 폭발 횟수

2010년	2011년	2012년	2013년
0회	7회	7회	12회

하지만 피해 최소화를 위한 최선의 방법은 경보상황을 신속하게 전달하는

것보다 피해를 줄 수 있는 태양흑점 폭발 현상을 미리 예측할 수 있는 기술을 확보하는 것이다. 이를 위해 우주전파센터에서는 태양활동 자동분석 모델(ASSA : Automatic Solar Synoptic Analyzer)을 개발하였다. ASSA는 우주전파환경 변화의 주요 원인인 태양흑점, 코로나홀, 필라멘트 등을 자동으로 인식하고 분석하여 태양흑점 폭발을 예측하는 프로그램을 말한다.

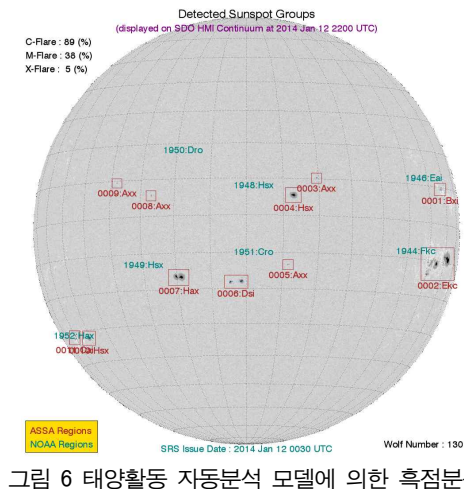


그림 6 태양활동 자동분석 모델에 의한 흑점분석

이전까지 태양의 흑점과 코로나홀 등의 현상을 국제적인 기준에 의해 자료화하고 발표하는 곳은 미국에서 수행해왔다. 또한 미국에서는 이러한 작업은 사람이 직접 관측자료를 이용하여 수작업으로 진행한다. 하지만 표준화된 기준에 의해 흑점 등의 정보를 분석한다고 해도 사람마다 개인의 주관성이 포함될 수 있다. 같은 흑점이라도 흑점의 크기, 자기장의 구조가 분석하는 사람들마다 다르게 결론을 내릴 수 있으므로 이에 대한 개인별 차이가 나타날 수 있다. 또한 기존의 흑점 분류 방식은 하루 1회만 수행하여 발표하게 된다. 그러나 흑점이라는 현상은 시시각각 실시간으로 변하는 특징이 있어 아침에는 비록 안정적인 구조를 보이더라도 저녁에는 3단계 이상의 전파두절 경보를 발령시킬 수 있는 흑점으로 발달할 수 있다. ASSA는 이러한 단점을 보완하여 태양흑점의 2가지 국제 분류법

(McIntosh & Mt. Wilson)을 수치적으로 정량화하여 매시간 동일 판단기준으로 흑점의 분류를 수행할 수 있으며 태양흑점의 발달 또는 쇠퇴하는 상황을 기존보다 빠르게 분석하여 태양흑점 폭발 발생의 확률적 기대치를 높일 수 있다.

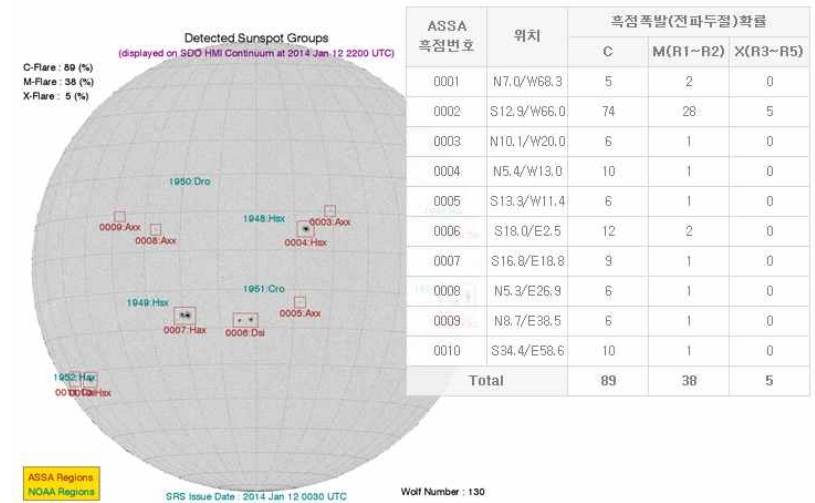


그림 7 흑점의 특성에 따른 태양흑점 폭발 확률 분석

이러한 시스템 개발을 위해 1969년부터 지상에서 관측된 흑점의 통계분석 자료를 이용하였고, 추가로 1996년 인공위성에서 관측한 자료도 활용하였다. ASSA에서는 이러한 자료를 바탕으로 자동으로 태양표면에서의 흑점을 탐지하고 과거자료를 이용하여 해당 흑점이 향후 3일간 태양흑점 폭발을 일으킬 수 있는 확률적 정보도 제공해 준다. 그리고 태양표면에서 관측되는 코로나홀이나 필라멘트 활동 내역도 자동으로 탐지할 수 있는 기능도 개발하여 전파두절뿐만 아니라 지자기 교란에 대한 예측업무를 좀 더 수월하게 진행할 수 있도록 정보를 제공해 주고 있다. 현재 ASSA는 2012년 12월부터 우주전파센터에 설치하여 3일 예보 등 업무에 활용되고 있으며 홈페이지를 통해 예측결과를 대외에 제공하고 있다. 또한 미국 NASA에서도 공식모델로 등록되어 있어 ASSA를 통한 국내 태양활동 분

석기술의 우수성을 알리고 국제사회에 우주전파센터의 국제적인 위상이 한층 높아진 계기가 되고 있다.

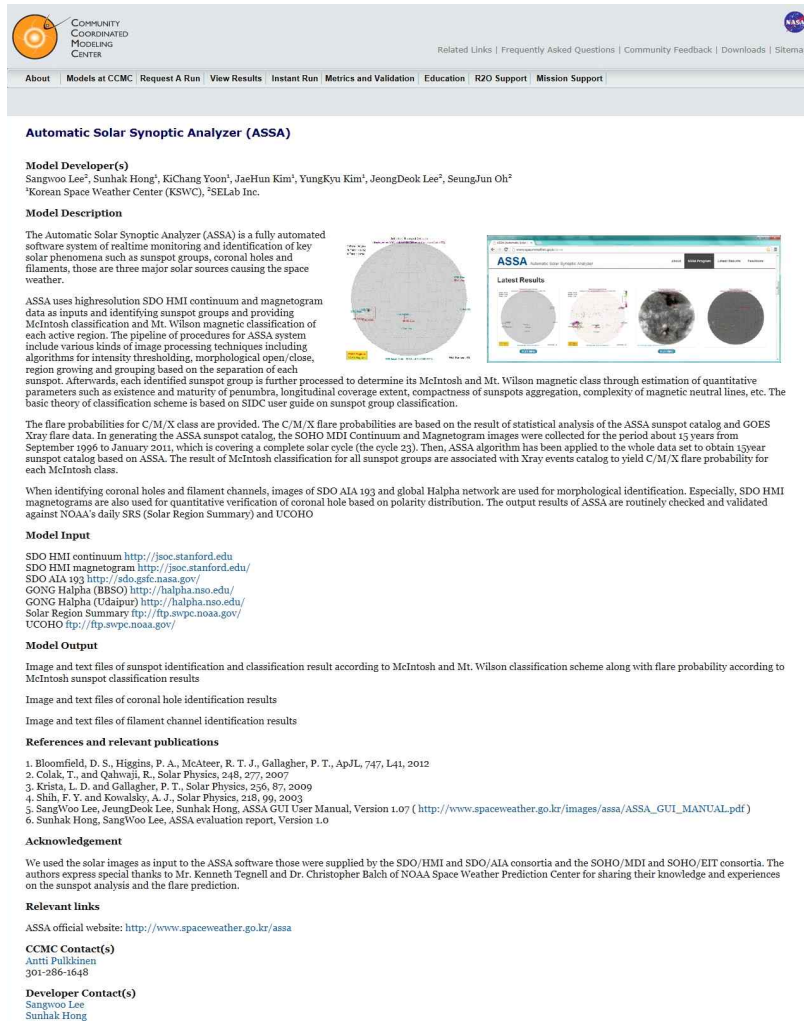


그림 8 NASA 우주환경모델링센터의 ASSA모델 설명 홈페이지

제3절 태양입자 유입에 대한 예보 서비스 개선연구

태양흑점의 활동은 전파두절 경보 발령을 발생시킬 뿐만 아니라 고에너지 입자를 우주공간으로 대량 방출하기도 한다. 태양에서는 태양풍이라는 태양 자기장과 플라스마를 우주공간으로 방출하고 있는데 플라스마의 경우 전자와 양성자로 구성되며 보통 수십~수백 KeV 에너지 대역을 가지고 있다. 이러한 플라스마 물질들은 태양 자기장을 따라 지구에 우주전파환경 변화에 한 원인된다. 하지만 태양흑점활동에 의한 태양흑점 폭발 현상이 발생할 경우 평소보다 높은 수십~수백 MeV 에너지 대역의 양성자들을 발생시키기도 한다. 이러한 입자들은 지구 자기권에 직접적으로 영향을 주게 되어 인공위성 내부의 다양한 전자기기에 장애를 발생시킬 수 있으며 대기권까지 진입할 경우 항공기 내부의 승무원 및 승객 피폭피해를 줄 수 있다. 특히 북극항로를 이용하는 항공기의 경우 평상시 보다 더 높은 피폭피해를 받을 수 있으며 극지방 전리층 교란으로 항공기와 지상관제소 사이의 통신이 두절 될 수 있다.

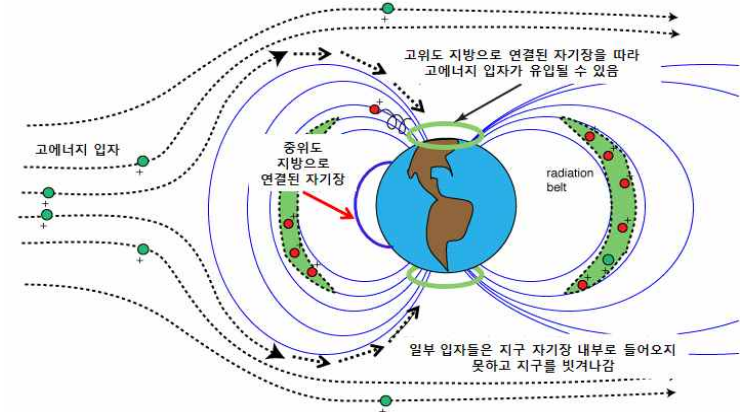


그림 9 지구 자기장 구조에 따른 고에너지 입자의 극지역 유입 과정

국제기준에 따라 태양입자 유입의 경보발령 기준은 10MeV이상의 에너지를 가지는 양성자의 개수에 따라 최대 5단계까지 구분되며 3단계 이상 태양입자 경보 수준에 도달하면 우주전파센터에서는 보도 자료를 배포하게 된다. 태양입자 유입은 앞에서 설명한 것처럼 태양흑점 폭발에 의해 발생하지만 코로나물질방출에 의해 발생하기도 한다. 코로나물질방출은 태양흑점 폭발이나 필라멘트 구조에 의해 나타나는데 평상시 태양풍보다 높은 속도와 밀도를 가지고 있는 것이 특징이다. 이러한 대규모 물질구조가 우주공간으로 방출될 경우 진행방향의 앞부분에서는 기존의 상대속도가 낮은 태양풍 물질을 압축하면서 충격파를 생성하게 된다. 이 과정에서 압축된 물질들은 온도가 상승하면서 고에너지 양성자가 만들어질 수 있다. 고에너지 입자들은 극성을 지니고 있기 때문에 태양 자기장에 속박되어 이동하게 된다.

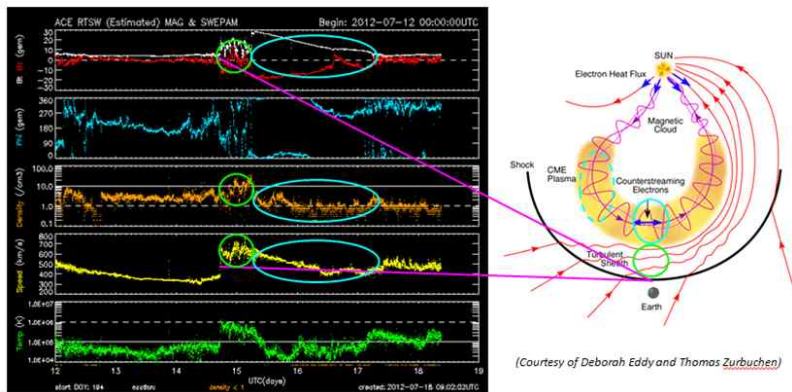


그림 10 코로나물질방출의 충격파에 의한 지구 영향 관측 자료

또한 태양 자기장은 자전효과에 의해 방사형태로 구성되어 있지 못하고 바람개비처럼 구부러진 모양을 유지하게 된다. 이러한 원인은 태양표면에 분포하는 고온의 태양 플라즈마가 태양 자기장과 같이 자전하려는 특성이 주요원인으로 지목되고 있다. 결국 고에너지 입자는 이러한 굴곡진 태양 자기장에 의해 이동 궤적이 결정되므로 고에너지 입자의 발생위치에 따라 지구 영향이 달라진다. 태양흑점 폭발의 경우 X선이라는 빛이 지구영향의

주요 원인이며 태양 자기장과 무관하게 방사형태로 직진하므로 태양 중심이든 태양의 가장자리든 위치에 따라 지구의 영향이 달라지거나 하지는 않는다.

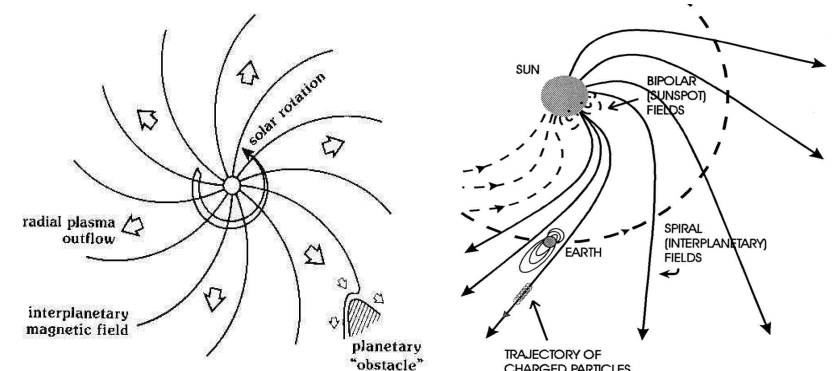


그림 11 태양자전에 의한 태양풍의 회전모형

다만 태양흑점 폭발 당시 한반도의 위치가 낮지역이나 또는 밤지역이나에 따라 영향 정도가 결정될 뿐이다. 반면 고에너지 입자의 경우 앞서 설명한 것처럼 태양 자기장의 굴곡으로 입자의 이동경로가 결정되므로 지구에서 태양을 바라볼 경우 태양의 좌측보다는 우측에서 발생할 경우 지구 영향 가능성이 훨씬 높아진다. 심지어 태양의 흑점이 태양면 우측으로 사라지면서 발생한 태양흑점에서도 고에너지 입자가 발생하여 태양입자 유입 경보가 발령되기도 한다. 또한 태양흑점 폭발이 발생되어 끝날 때까지의 지속시간과도 연관성이 있다. 일반적으로 태양흑점 폭발은 수분 이내에 짧게 종료되지만 간혹 수십 분에서 수 시간씩 지속되는 경우도 나타난다. 이럴 경우 고에너지 입자를 만들어내는 현상이 그 만큼 길게 유지가 되므로 고에너지 입자량도 함께 증가하게 된다. 결국 태양입자 유입에 대한 예보 서비스는 태양흑점의 위치와 흑점 폭발 강도, 시간, 그리고 코로나물질방출의 속도 등 다양한 정보를 이용하여 개발되어야 한다. 우주전파센터에서는 이러한 통계적 분석을 위해 1976년부터 수집된 태양흑점 폭발 자료, 코로나물질방출 관측자료, 고에너지 입자 관측 자료를 이용하였다.

그리고 통계적으로 분석한 자료를 실제 태양입자 유입 예측 모델의 알고리즘으로 활용하기 위해 인공신경망(Artificial Neural Network)을 사용하였다. 태양입자 유입은 앞서서도 언급했지만 태양흑점 폭발이나 코로나물질방출에 의해 발생한다. 그러나 강한 태양흑점 폭발이 발생하더라도 실제 지구에 나타나는 태양입자 유입의 발생이 1:1 비율로 나타나지는 않는다. 실제로 지난 2011년에 발생한 태양흑점 폭발에 의한 전파두절 경보발령은 총 118회였지만 태양입자 유입 경보 발령은 8회로 나타났다. 그 다음해인 2012년에도 전파두절 경보발령은 129회였지만 태양입자 유입 경보발령은 28회만 발령되었다. 2013년에도 태양입자 유입 경보 발령은 전파두절 경보발령에 비해 약 1/10 수준이었다.

표 2. 2013년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역

구분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	계
전파두절(X선)	92	7	12	-	-	111
태양입자 유입(양성자)	7	3	1	-	-	11

표 3. 2012년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역

구분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	계
전파두절(X선)	106	16	7	-	-	129
태양입자 유입(양성자)	20	6	2	-	-	28

표 4. 2011년 전파두절 및 태양입자 유입의 단계별 경보 발령 내역

구분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	계
전파두절(X선)	100	11	7	-	-	118
태양입자 유입(양성자)	8	-	-	-	-	8

결국 태양입자 유입 현상은 태양흑점 폭발이 있다고 해서 항상 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 그러면 단순히 과거 자료의 통계분석을 통한 태양입자 유입의 확률적 예보가 신뢰성에서 낮아질 수 있다는 문제점이 제기될 수 있다. 이에 우주전파센터에서는 인공신경망 알고리즘을 도입하여 이 문제점을 보완하였다. 인공신경망 알고리즘은 1960년대 인간처럼

판단하는 컴퓨터를 만들기 위해서 인간의 두뇌 구조를 모방하여 만들어진 모델로 패턴인식이나 분류에 강한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 인공신경망 알고리즘은 입력된 데이터를 임의의 가중치를 가지는 다양한 함수 구조에 입력하여 결과값을 얻어내고 다시 새로운 가중치로 다시 함수 구조에 입력하여 출력값을 가지는 형태로 요약할 수 있다. 이는 알고리즘 자체가 일중에 학습효과를 수학적으로 재구성하고 있다는 것을 의미한다. 즉, 태양흑점 폭발이 발생할 경우 태양입자 유입 발생 확률을 과거 자료로부터 얻지만 비슷한 태양흑점 폭발 규모로도 태양입자 유입 발생이 없었던 이벤트까지 고려해야 하므로 각각의 경우에 서로 다른 가중치를 두어 예측값을 도출한다. 이후 이 값은 다시 과거의 태양흑점 폭발과 이에 따른 태양입자 유입 발생 사례에 대한 함수의 입력값이 되고 새로운 가중치를 이용하여 재평가되는 방식이다. 현재 이 모델은 개발이 완료되어 실제 예보업무에 사용되고 있으며 우주전파센터 홈페이지에서 확인할 수 있다. 그리고 아직까지는 운영 초기이므로 향후 태양흑점 폭발에 따른 태양입자 유입 경보발령 상황 점검을 통한 평가를 수행해야 하며 평가 결과는 성능개선에 적용될 예정이다.

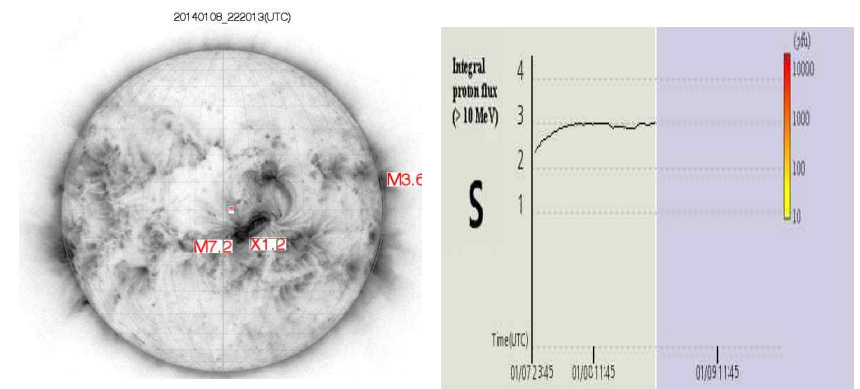


그림 12 태양흑점 폭발에 따른 태양입자 유입 예보

제4절 지자기 교란에 대한 예보 서비스 개선연구

우주전파환경의 변화 중 지자기 교란은 전파두절 및 태양입자 유입에 비해 가장 늦게 나타나는 현상이다. 코로나물질방출 등의 현상이 발생하면 코로나물질방출 내부에는 태양에서 떨어져 나온 자기장과 태양물질들이 포함되어 있다. 이러한 태양자기장과 물질들은 지구 자기장과 상호작용하면서 지자기 교란이 나타난다는 것이 정설로 받아들여지고 있다.

표 5. 태양활동에 의한 태양방출 물질의 주요 특징

구 분	주요 특징	속도	지구도달시간
X선	매우 짧은 파장(nm~pm)대의 전자기파, 물질 투과성질이 매우 높음	30만km/s	약 8분 20초
고에너지 입자	수백만~수억 전자볼트(eV)의 에너지를 가진 입자(전자, 양성자 등)	수천~수만 km/s	수시간 이내
코로나 물질	태양 대기를 구성하는 전자, 양성자, 헬륨 등으로 구성(약 100만도 이상)	약 3~700 km/s	수 일 이내

이때 지자기 교란의 강도를 결정짓는 요소는 행성간 자기장의 Bz 성분, By 성분, 태양풍의 밀도, 속도가 있다. 지구의 자기장은 남과 북의 두 개의 극성이 존재하므로 우주공간에서보면 항상 남쪽에서 북쪽방향으로 방향성이 고정되어 있으며 태양풍의 효과로 낮지역은 항상 압축된 형태를 그리고 밤지역은 늘어난 형태를 유지하고 있다.

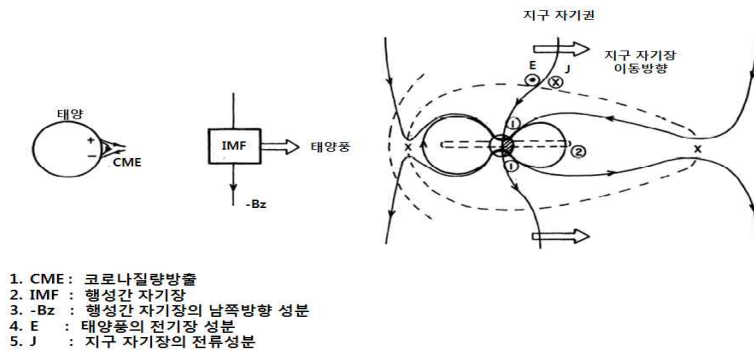


그림 13 행성간 자기장과 지구 자기장이 재결합으로 이동되는 모습

하지만 코로나물질방출 등의 경우 내부의 자기장은 항상 고정되어 있지 않고 시간에 따라 다르게 변하는 특징이 있다. 이렇게 다양하게 변하는 자기장의 구조가 지구 자기장과 만날 경우 자기장의 방향에 따라 지구 자기장이 변화를 일으켜 지자기 교란이 발생한다. 특히 지구 자기장과 재결합(Reconnection)을 일으킬 수 있는 방향 즉, 남쪽방향의 자기장이나 동쪽방향의 자기장 성분이 갑자기 서쪽방향으로 변하는 특징을 보일 경우 지자기 교란의 강도가 높아진다.

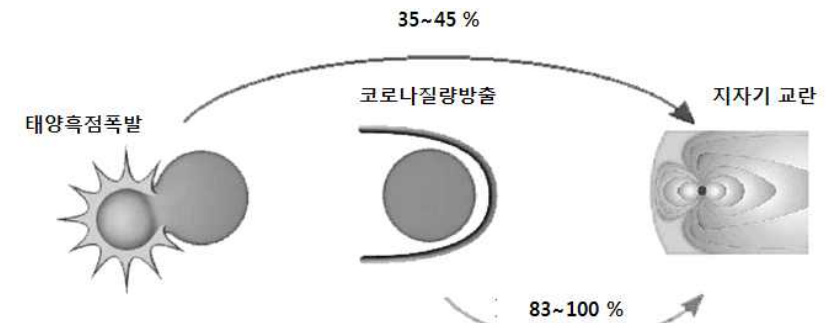


그림 14 태양흑점 폭발 및 코로나물질방출에 따른 지자기 교란 발생 확률

여러 연구에 의하면 행성간 자기장의 Bz 성분이 남쪽방향의 크기가 클수록 그리고 오래 동안 지속될수록 지자기 교란 현상이 자주 발생하며 강도가 높아진다. 또한 행성간 자기장의 By 성분의 방향이 달라지는 시간이 짧을수록 그리고 달라지는 규모가 클수록 지자기 교란 현상이 발생한다. 따라서 이번 지자기 교란 예보 서비스 개선연구에서는 행성간 자기장에 따른 지자기 교란 연관성을 포함시켜 개발하였다. 행성간 자기장 방향이 외에 태양풍의 밀도와 속도 역시 지자기 교란과 연관성이 있다는 연구결과가 많이 발표되고 있다. 비록 행성간 자기장보다는 그 규모가 작지만 태양풍의 속도와 밀도는 태양풍동압력의 형태로 지구자기장을 압축시키는 역할을 하게된다. 즉, 지구의 낮지역 자기장을 평상시보다 더욱 압축시키는 역할을 하는데 압축되는 강도와 시간이 지자기 교란의 강도를 결정한다.

다. 현재 우주전파센터에서는 태양풍 예측을 위해 Enlil 및 IPS모형을 구축하여 운용하고 있으며 이 모델에서 얻어진 태양풍의 밀도와 속도의 예측결과를 지자기 교란 예측 모델에 활용하도록 구성하였다. Enlil과 IPS 모델은 2013년 1월과 5월 각각 구축되어 현재까지 운용되고 있다. Enlil 모델은 미국 NASA에서 개발한 태양풍 예측모델로 인공위성에서 관측한 코로나물질방출의 시각적 모습을 이용하여 코로나물질방출의 방출방향(위도, 경도), 크기, 이동속도를 계산하고 이 정보를 MHD(magnetohydrodynamics) 수식에 대입하여 코로나물질방출을 재구성하는 모델이다.

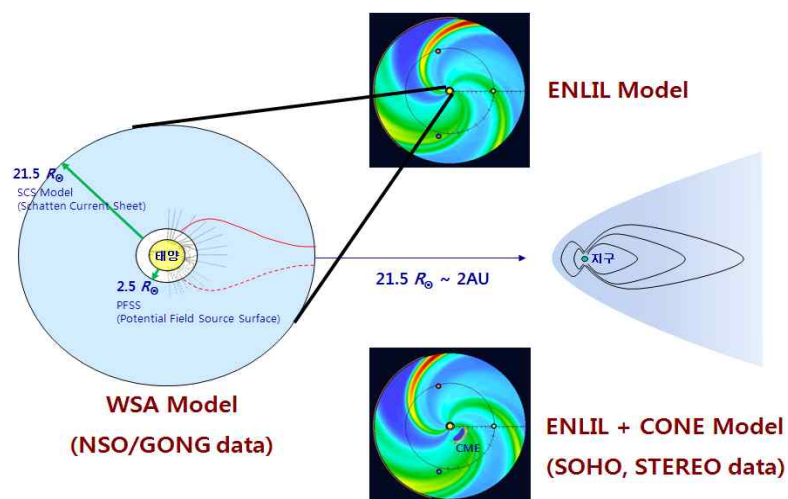


그림 15 Enlil 모델의 구조 및 입력데이터 종류

기본적인 코로나물질방출 요소들은 수치적으로 계산하여 예측하기 때문에 예측에 대한 정확도가 높다는 장점을 가지고 있다. 따라서 여기서 얻어진 태양풍의 속도와 밀도는 지자기 교란 확률 예측 프로그램의 입력데이터로 활용이 가능하다 물론 지자기 교란은 행성간 자기장의 방향에 따라서도 결정되므로 이 정보도 포함되어야 하지만 우주전파센터에서는 현재 태양풍의 예측모델을 활용한 지자기 교란 예측 모델을 개발하여 태양풍 예측모델이 지자기 교란 예측 모델로 서로 연계할 수 있도록 업무를

추진하고 있으므로 이에 맞춰 개선연구를 진행하였다. Enlil 모델과는 예측방법이 다른 IPS에서도 태양풍의 밀도와 속도를 얻어 낼 수 있다. IPS 모델은 지구에서 태양을 바라볼 때 태양 주변에 분포하는 웨이사 또는 중성자 별 등의 광원이 소스가 되어 이 광원으로부터 방출되는 빛이 행성간 공간을 지날 때 태양풍에 의한 깜빡거리는 현상을 이용하여 태양풍의 이동방향과 밀도, 속도를 예측하는 모델을 말한다.

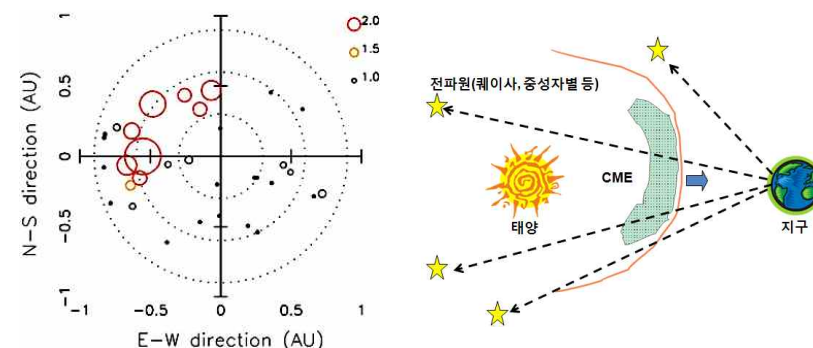


그림 16 IPS 관측 방법 및 실제 관측결과

현재 IPS 관측을 수행하고 있는 곳은 우주전파센터 이외에 일본, 인도, 멕시코 등이 있으며 여기서 관측된 데이터를 이용하여 태양풍의 이동경로를 예측하는 모델을 개발한 곳은 미국의 UCSD이다. 우주전파센터에서는 UCSD와 협력을 통해 IPS 모델을 도입하여 2013년 5월부터 운용에 들어간 상태이다. Enlil 모델과 IPS 모델은 태양풍의 속도와 밀도, 방향 및 지구도착시간을 예측한다는 공통점이 있지만 태양풍을 예측하기 위한 입력데이터 수집 방법이 다르다. 또한 Enlil 모델은 인공위성에 관측된 이미지 데이터를 기본으로 현재 SOHO, STEREO 위성이 그 역할을 하고 있다. 하지만 SOHO의 경우 지난 1997년에 발사되어 현재까지 운영되고 있어 이미 사용가능 연수를 넘긴 상황이다. 또한 STEREO 위성은 두 개의 위성으로 이루어져 지구 공전궤도에 위치하고 있지만 점차 태양 뒷면으로 이동하고 있어 향후에는 Enlil 모델의 입력 자료로 활용하기 힘들 전망이다. 결국 우주공간에서 관측된 태양풍 이미지가 절대적으로 필요한 Enlil 모델

을 보완하기 위한 대책이 필요하다. 반면 IPS 모델에 사용되는 입력 자료는 대부분 지상에서 수집되고 있다. IPS 예측 모델에 필요한 입력데이터는 IPS 관측자료, 태양표면 자기장 관측자료, ACE 위성에서 측정된 태양풍 자료이다. ACE 위성 관측 자료를 제외하고 태양표면 자기장 관측 자료와 IPS 관측 자료는 모두 지상에서 관측되고 있다. 따라서 Enlil 보다는 데이터 수집에 안정적이라고 할 수 있다. 또한 한국, 일본, 인도, 멕시코 등에서 관측을 하고 있으므로 준 실시간으로 데이터가 수집에 의한 모델 상시 운용이 가능하다. 하지만 태양풍을 위성관측처럼 직접적으로 관측하는 방식이 아닌 광원의 흔들거림 현상을 이용하여 태양풍의 상태를 간접적으로 측정하는 방식을 사용하고 있다는 단점이 있다. 다시 말해 코로나 물질방출에 의한 광원의 흔들거림 정도를 파악하기 위해서는 코로나물질방출이 발생하지 않을 때의 상태를 먼저 알고 있어야 코로나물질방출의 규모를 측정하는데 신뢰성이 높다. 하지만 행성간 공간에서의 태양풍은 항상 변하고 있어 어떤 평균값의 흔들거림을 측정하기가 쉽지 않다.

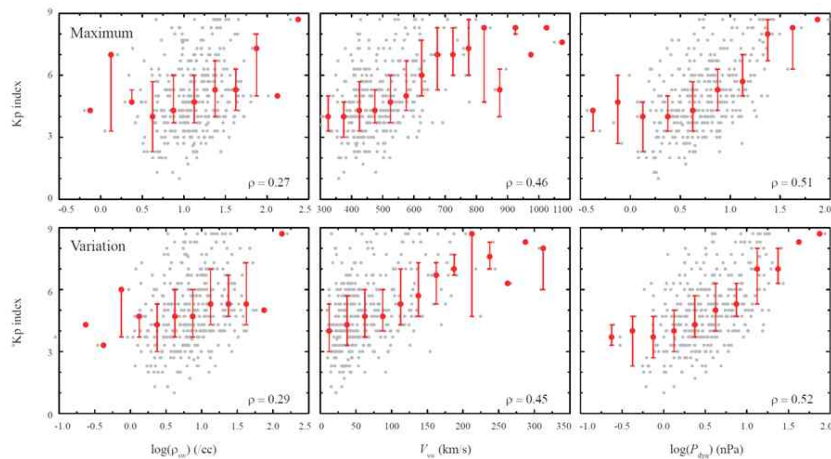


그림 17 태양풍의 밀도, 속도, 동압력에 따른 지자기 교란 지수 변화

따라서 우주전파센터에서는 두 모델들이 모두 각각의 단점들이 존재하기 때문에 예보의 객관성과 정확도를 높이기 위해 두 모델을 같이 운용하

고 있으며 2014년도에는 두 모델을 통합하여 각각의 단점을 보완할 수 있는 시스템을 구축하려고 한다. 따라서 이번에 개발된 지자기 교란 예측 프로그램은 향후에도 지속적으로 사용이 가능하며 추가 개선을 통해 예측의 정확도 향상을 추진할 수 있다. 올해 개발된 지자기 교란 지수 예측 모델은 Enlil에서 수집된 태양풍의 속도와 밀도를 이용하였다. 또한 속도와 밀도에 따른 지자기 교란 예측을 위한 태양풍인자와의 상관관계 연구를 수행하였다. 자기장과와의 상관관계는 이미 많은 다른 연구를 통해 행성간 자기장의 방향에 따라 결정된다고 알려져 있다.

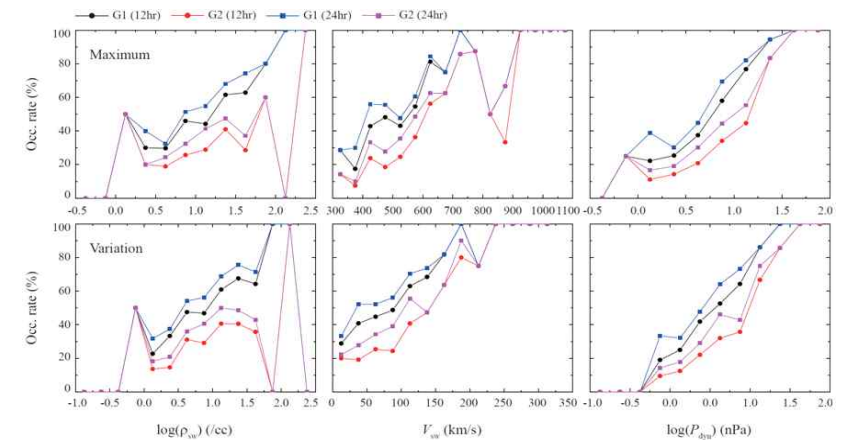


그림 18 태양풍의 밀도, 속도, 동압력에 따른 지자기 교란 발생률

이번 연구에서는 자기장이외에 태양풍의 속도와 동압력에서 지자기 교란 지수와 높은 상관관계를 보였으며 밀도는 그 변화량이 비교적 낮게 나타났다. 또한 각 단계별 지자기 교란 경보 발생률을 계산한 결과 1, 2단계 지자기 교란을 발생시킬 확률이 50%가 되기 위해서는 태양풍 속도의 경우 550 km/s 이상이어야 하며 태양풍 동압력의 경우 6nPa 이상이 되어야 한다는 결과가 나왔다.

제3장 예보 서비스 품질평가

제1절 개 요

국제우주전파환경 서비스 기구의 대한민국 대표기관인 우주전파센터는 한반도의 우주전파환경 지역경보를 담당하고 있으며 ISES 규정에 따라 예보서비스 품질향상에 노력해야 한다. 이에 따라 2012년 자체연구과제로 우주전파센터의 예보 서비스를 평가하기 위한 방법을 소개하였다. 올해에는 2012년에 제시된 다양한 방법에 대한 개선과 새롭게 추가된 품질평가 방법을 도입하고 우주전파센터의 예보 서비스 품질평가를 통해 작년대비 올해 실적과 문제점 및 이에 대한 해결책을 모색해 본다. 또한 해외기관들과의 비교를 통해 현재 우주전파센터의 예보 서비스가 선진국과 비교하여 어느 수준인지 알아보기로 한다.

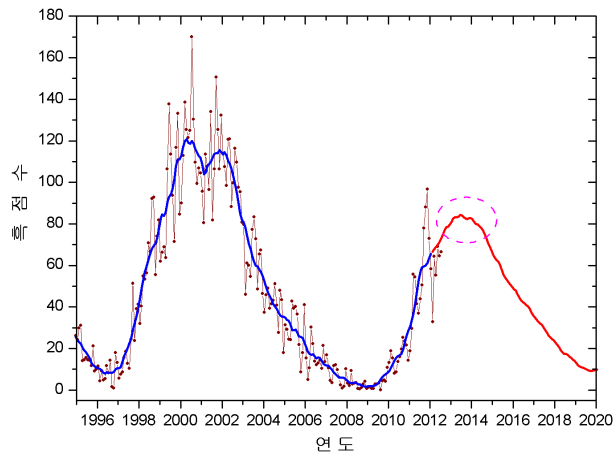


그림 19 연도별 태양활동에 따른 흑점수 변화 및 예측

2013년은 3단계 이상의 태양활동이 매우 활발하였다. 특히 태양의 흑점수가 지난 2011년이 최대치를 보였지만 그 이후 지금까지 태양활동에 의

한 3단계 이상의 경보 발령은 꾸준히 유지해 왔다. 이러한 현상은 지난 태양활동 23주기 극대기에서도 확인할 수 있다. 당시 2000년이 태양흑점수 수치상 가장 높은 170을 기록하여 태양활동 극대기로 지정되었지만 그 이후 2005년까지 3단계 경보발령이 12회에서 최대 19회까지 경보가 발령되었다. 더구나 2000년에는 발령되지 않았던 4단계 경보발령도 2001년, 2003년, 2005년에 발령되는 특징이 보였다.

표 6. 태양활동 각 주기별 3단계 전파두절 경보발령 현황

구분	3단계 전파두절 경보발령 분포						월평균 최대 흑점수
23주기	2000년	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	170(2000년 7월)
	18회	19회	12회	17회	12회	17회	
24주기	2011년		2012년		2013년		96(2011년 9월)
	7회		7회		14회		

표 7. 태양활동 23주기 3단계이상 전파두절 경보발령 현황

구분	3단계	4단계	5단계	월평균 최대 흑점수
1999	5	0	0	137(6월)
2000	18	0	0	170(7월)
2001	19	2	0	150(9월)
2002	12	0	0	120(4월)
2003	17	3	0	83(7월)
2004	12	0	0	51(7월)
2005	17	1	0	42(5월)
2006	3	0	0	30(4월)
총계	103	6	0	

따라서 이러한 패턴은 이번 태양활동 24주기에서도 나타날 수 있어 태양활동에 대한 예보 서비스 품질평가를 꾸준히 시행할 필요가 있으며 이에 대한 결과는 예보 서비스 개선에 사용되도록 제도적 개선이 필요하다.

제2절 예보 서비스 품질평가 방법

2012년에 제시된 예보 서비스 품질평가 방법은 "예보관측 비교방법", "신뢰도 방법", "일일 예보 확률값 비교 방법" 등 3가지를 소개하였다. 그리고 올해에는 "상대평가곡선방법", "예보 효율성 비교 방법", "확장형 예보관측 비교 방법"을 추가로 제시하였으며 2012년도에 제시되었던 신뢰도 방법과 일일 예보 확률값 비교 방법은 올해에는 제외하였다. 일일 예보 확률값 비교 방법의 경우 매일 예보 확률값을 단순 비교하여 어느 기관의 예보 점수가 더 높은지 확인하는 방식으로 이 방법은 어떤 통계적 방법이 포함되어 있지 않아 예보 서비스 품질평가의 객관성 확보를 위해 이번 연구에서는 제외하였다. 신뢰도 방법의 경우 전체 예보확률 구간인 0 ~ 100% 중 특정 예보확률에 대해 실제로 경보가 발령된 비율이 예보된 확률만큼 발생되었는지를 확인하는 방법으로 각각의 예보 확률구간에 대한 구체적인 평가가 가능하여 채택되었다.

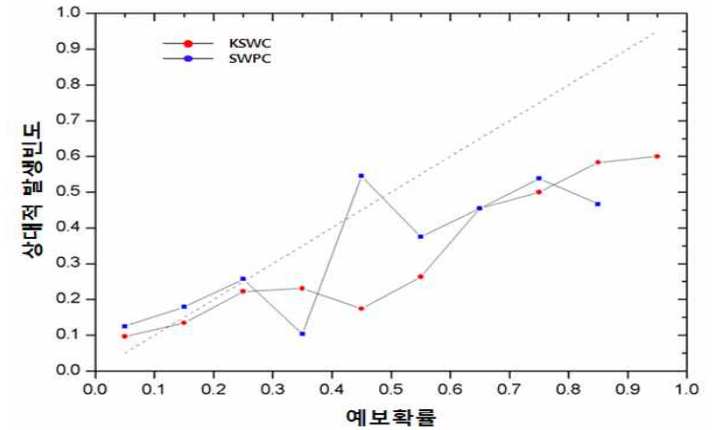


그림 20 2012년 우주전파센터와 SWPC의 신뢰도 분석

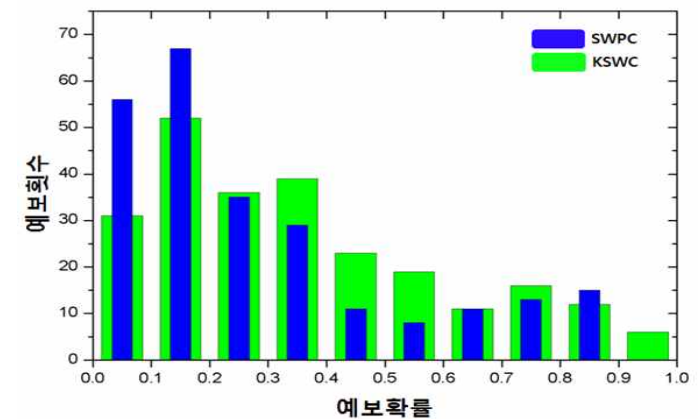


그림 21 2012년 우주전파센터와 SWPC의 예보횟수 현황

표 8. 2012년 예보 서비스에 대한 품질평가 결과

구 분	예보 · 관측 비교표 방법	
	우주전파센터	SWPC
산술적 적중률	0.482	0.372
예보 실패율	0.562	0.531
예보 편향도	1.1	0.79
예보적중지수(높을수록 좋음)	0.297	0.261
구분	신뢰도 방법	
	우주전파센터	SWPC
예보점수(높을수록 좋음)	0.206	0.253

지난 연구에서 나타난 결과값은 낮을수록 좋은 평가를 얻는 구조라 일반인들이 수치에 대한 이해가 어렵다는 의견이 제시되었고 평가 결과에 대한 신뢰도 분포에서 샘플데이터가 부족한 문제가 있어 이번 연구에서는 제외하였다.

우리는 흔히 날씨에 대한 얘기를 할 때 '내일은 비가 온다' 또는 '내일은 비가 오지 않을 것이다'라는 형식으로 말을 한다. 즉 동전의 앞면 또는 뒷면이라는 두 가지에 대한 확률적인 표현으로 비가 내릴지 내리지 않을

지를 결정한다. 예보·관측 비교방법은 이러한 방식으로 품질을 평가하는 방식으로 특정이벤트에 대해 예보부분은 "예측된 이벤트(f_y 고 표현)"와 "예측되지 않은 이벤트(f_n)"라고 표현하고 관측부분은 "관측된 이벤트(O_y)"와 "관측되지 않은 이벤트(O_n)"로 나누어 아래 표와 같은 구조를 만든다.

표 9. 예보 · 관측 비교표

구 분		관측부분	
		관측된 이벤트 (O_y)	관측되지 않은 이벤트 (O_n)
예보부분	예측된 이벤트 (f_y)	A	B
	예측되지 않은 이벤트 (f_n)	C	D

그리고 과거의 샘플데이터를 이용하여 각각 경보가 발령된 날짜에 대한 확률값이 임계점에 따라 f_y 와 f_n 으로 다시 관측유무에 따라 O_y 과 O_n 로 구분하여 A, B, C, D 값을 결정한다. A는 특정이벤트를 예측한 상태(참)에서 실제로 관측된 경우(참)이며, B는 예측은 참이지만 이벤트가 거짓인 즉 실제로 경보가 발령되지 않은 경우를 의미한다. 비슷한 방식으로 C는 예측은 거짓이지만 관측은 참인 경우이며, D는 예측과 관측이 모두 거짓인 경우다. 그러면 예보 서비스 품질평가에서는 예측한 사항이 실제 관측과 일치되어야 하므로 A와 D가 예보 서비스가 얼마나 정확하게 이루어 졌는지 평가할 수 있는 수치에 해당한다. 따라서 통상적으로 예보점수 또는 예보 정확도는 다음과 같이 결정된다.

$$(A + D) / (A + B + C + D) \tag{1}$$

그러나 여기에는 한 가지 유념해야할 사항이 있다. 앞서 언급했듯이 예보 관측 비교방법은 특정 이벤트에 대해 표를 작성하는 방식이다. 예를 들어 내일 비가 내리는지 내리지 않는지에 대한 예보 서비스와 이에 대한 평가

를 한다고 가정하면 A는 "비가 내릴 것이다"라는 예측이 실제로 "비가 내렸다"라는 관측값을 의미하며 D는 "비가 내리지 않을 것이다"라는 예측이 실제로 "비가 내리지 않았다"라는 관측 결과를 의미한다. 그러면 이런 상황을 일반 국민들의 입장으로 생각해 보자. 내일 야외에서 중요한 약속이 있는데 비가 오면 안되는 상황은 누구나 경험을 해봤을 것이다. 그러면 당연히 "내일 비가 내리는지"에 대한 관심이 가게 되고 이와 관련된 정보를 찾게 마련이다. 물론 "내일 날씨가 맑을까?"라는 정보에 관심을 가지는 국민들도 있을 것이다. 또는 "내일 바람이 많이 부는지", "내일 눈이 오는지", "내일 구름이 많이 끼는지" 등 다양한 정보가 생길 수 있다. 다시말해 사용자는 자기가 관심이 있는 정보만 원한다는 것이다. 따라서 예보 서비스에 대한 평가도 사용자가 원하는 정보에 맞춰 평가를 실시해야 한다. "비가 내리는지"에 대한 정보는 "비가 내릴 것이다"라는 예측에 대한 실제 "비가 내렸다"라는 A의 정보가 예보 서비스 평가 시 매우 중요하며 "날씨가 맑을지"에 대한 정보는 "맑을 것이다"라는 예측에 대한 실제 "날씨가 맑다"라는 정보가 예보 서비스 평가에 중요 요소로 작용된다. 좀 더 구체적인 예를 들어 보자. 아래의 두 표는 특정 이벤트 발생에 대한 두 기관의 예보관측 비교방법 적용한 사례이다.

표 10. 기관 1에 대한 예보 · 관측 비교표

구 분		관측부분	
		관측됨	관측되지 않음
예보부분	예보됨	35	40
	예보되지 않음	20	350

표 11. 기관 2에 대한 예보 · 관측 비교표

구 분		관측부분	
		관측됨	관측되지 않음
예보부분	예보됨	0	0
	예보되지 않음	45	400

앞에서 제시한 예보 정확도에 따라 두 기관의 예보 점수는 각각 86점과 89점으로 비교적 높다고 할 수 있다. 하지만 각각의 표에서 A에 해당되는 정보를 보면 기관 1은 이벤트가 발생될 예보에 대한 실제 관측이 35회가 되지만 기관 2는 단 1건도 맞추지 못했다. 다만 기관 2의 경우 이벤트가 발생되지 않을 예보에 대한 실제 관측되지 않은 횟수가 400회가 되어 예보 점수가 기관1과 비슷한 것이다. 그러면 사용자 입장에서는 "내일 비가 오는지"에 대한 사항이 주요 관심정보이므로 기관 2의 예보정보 보다는 기관 1의 예보정보를 더 선호하게 될 것이다. 결국 기관 2는 특정 이벤트에 대한 예측 능력(예보점수)이 낮지만 수식에 의해 예보능력이 높다는 평가 결과가 나온다. 물론 다음과 같이 생각할 수 있다. "내일 비가 내리지 않을 것이다"라는 예측은 "내일은 날씨가 맑은 것이다"라는 의미로 해석할 수 있어 D의 정보는 맑은 날씨에 대한 정보라는 관점이다. 하지만 처음부터 예보서비스 평가를 시작했을 때 서비스 평가 대상은 사용자의 주요 관심정보인 "내일 비가 내리는지" 이 한 가지 정보이다. 만일 날씨가 맑다라고 하는 정보를 고려한다면 "내일은 날씨가 맑을 것이다"를 예보 서비스 평가 대상으로 처음부터 선정했어야 한다. 아니면 "내일은 비가 온다"와 "내일은 날씨가 맑을 것이다"라는 두 가지 정보를 대상으로 동시에 예보 서비스 평가를 실시해야 한다. 전자의 경우 각각의 정보에 대해 두 가지 예보 서비스 평가 결과가 나와야 하며 후자의 경우 기존 2가지 선택형(참, 거짓)인 예보관측 비교방법을 복수 선택형(비, 맑음, 기타 등등) 예보관측 비교방법을 사용해야 한다. 이럴 경우 이미 확장형 예보관측 비교방법이 나와 있으며 이에 대한 설명은 아래에서 다시 하도록 하겠다. 아무튼 예보관측 비교방법에서는 이러한 이유로 식(1)을 대신하기 위한 다양한 계산방식이 추가로 개발되기 시작하였다. 우주전파센터에서도 이러한 문제점을 고려하여 기본 방법이 아닌 아래와 같은 새로운 식으로 예보 점수를 산출하였다.

$$A/(A+B+C) : \text{Critical Success Index} \quad (2)$$

$$B/(A+B) : \text{False Alarm Ratio} \quad (3)$$

$$A/(A+C) : \text{Hit Rate} \quad (4)$$

$$(A+B)/(A+C) : \text{Frequency Bias} \quad (5)$$

위의 식은 Critical Success Index(임계성공지수)라고 하며 논란이 될 수 있

는 D의 정보를 아예 제외시킨 예보점수 산출 방식이다. 또한 예보관의 예보된 자료 중 관측되지 않은 예보 비율이 얼마나 있는지를 알아볼 수 있는 예보 실패율, 예보된 횟수가 관측된 횟수에 비해 얼마나 있는지에 대한 편향도도 계산하여 추가 분석이 가능하도록 했다. 예보관측 비교방법은 평가기간동안 예보 서비스 평가 대상 전체에 대해 평가하며 간단한 방법으로 평가가 가능하다는 장점을 보유하고 있지만 확률 중심의 예보 서비스의 각각의 확률 구간에 대한 좀 더 정확한 분석이 어렵다는 단점을 보유하고 있다. 이에 우주전파센터에서는 예보 효율성 비교 방법을 추가로 이용하였다.

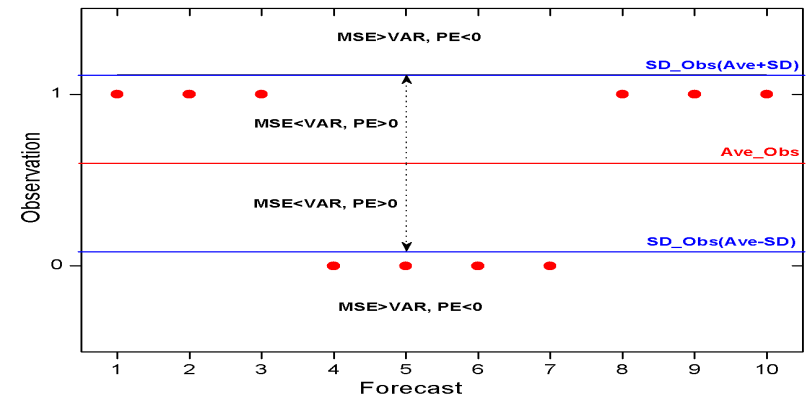


그림 22 MSE와 VAR에 따른 예보효율성 변화

확률 이용한 예보 서비스는 사용자가 이벤트의 발생 가능성을 좀 더 수치적으로 가늠할 수 있어 쉽게 예보 정보를 획득 할 수 있다. 또한 예보관은 예보의 정보를 과거의 데이터를 기반으로 통계적이나 객관적인 방법으로 산출하는 경우가 대부분이며 이때 주로 수식을 이용한다. 따라서 특정 수치를 확률적인 분포로 전환하여 표기함으로써 확률 중심의 예보 서비스가 쉽게 적용될 수 있다. 또한 확률 중심의 예보 서비스를 평가할 때 특정 구간을 선정하여 평가할 수 있어 구간별 예보 서비스에 대한 패턴분석이 가능하여 각 구간별 장단점을 이용한 예보 서비스 개선에 바로 적용할 수 있다. 예보 효율성 비교 방법에 사용되는 기본적인 수식은 다음과 같다.

MSE는 각각 구간에 대해 예측값과 실제 관측값에 대한 차이 제곱의 평균인 평균제곱오차이며 VAR는 통계에서 자주 사용되는 분산으로 샘플데이터가 특정구간에 얼마나 분포하는지 알려주는 요소이다. 예보의 효율값(PE)는 이 두 가지 수치의 비율과 1과의 차이로 결정된다. 그리고 PE는 최대 1에서 최소 0보다 작은 값을 가질 수 있다. 이때 0이상의 양의 정수는 모두 예보의 효율성이 좋다고 할 수 있으나 0이하의 음수인 경우 예보 실력을 판단할 수 없을만큼 예보점수가 나쁘다는 의미이다.

$$PE = 1 - \left(\frac{MSE}{VAR} \right), \quad MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - x_i)^2, \quad VAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

f_i : 예측정보, x_i : 관측정보, \bar{x} : 관측정보평균

f_i 는 예측값으로 0부터 1까지 범위를 가지며 x_i 는 관측값으로 관측이 참일 경우 1이지만 관측이 거짓이면 0으로 자동 결정된다. 따라서 예보 효율성은 예측된 값과 실제 관측된 값의 평균오차가 전체 평균의 분산 영역에서 얼마만큼 떨어져 있는가에 따라 결정되며 만일 평균제곱오차가 분산보다 작으면 예측된 값은 항상 분산영역에 포함되므로 PE값은 항상 양의 값을 유지하여 예보 효율성이 높지만 VAR이 MSE보다 작으면 PE가 음수가 되어 예보스킬이 낮다고 할 수 있다.

표 12. 2012년도 예보 서비스에 대한 일일 확률값 비교 및 예보 효율성 비교

구 분		KSWC	SWPC
일일 확률값 비교 방법	경보 발령 시	46일	7일
	경보 미발령 시	31일	161일
예보 효율성		0.130	0.208

예보 효율을 측정하는 방법은 이미 미국에서도 시행하고 있는 자료이다. 미국의 SWPC에서는 과거 1986년부터 예보 서비스에 대한 예보점수

(Forecast Skill)를 예보효율성(Prediction Efficiency)를 이용하여 표현하고 있다. 지금까지 공식적으로 발표된 자료를 보면 1986년부터 2012년까지 대부분 0보다 큰 예보점수를 나타내어 예보의 효율성이 좋다고 할 수 있다. 상대적으로 예보점수가 0보다 낮은 구간은 이벤트 발생개수가 적어 예보점수가 낮게 표현된 것으로 분석할 수 있다.

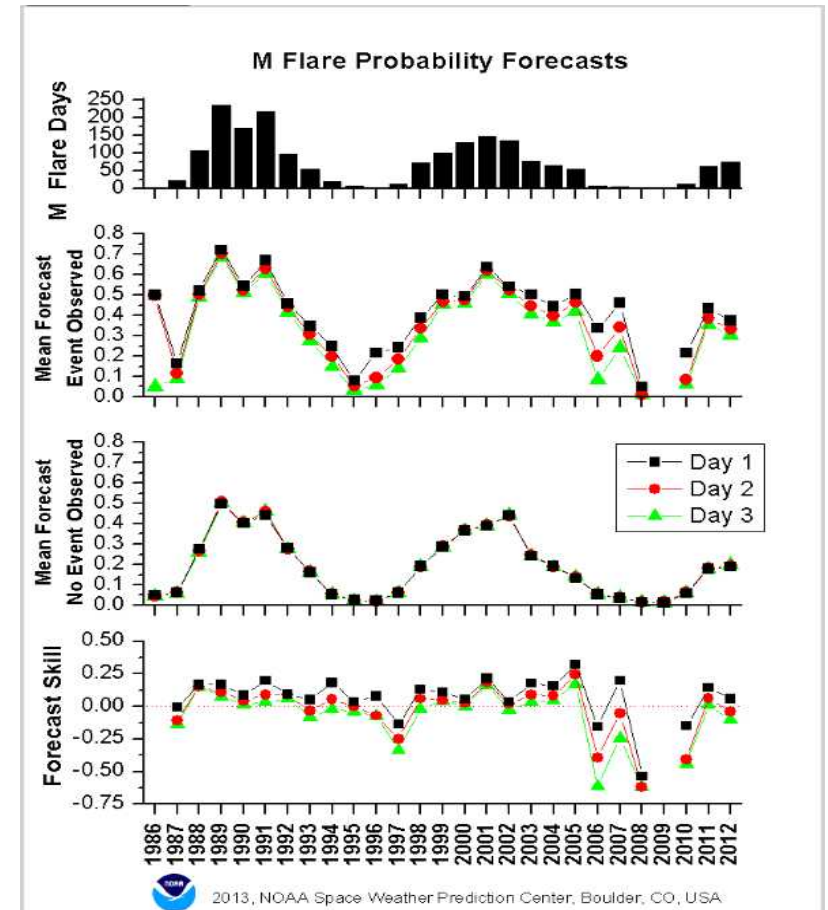


그림 23 예보 효율성을 이용한 미국 SWPC의 예보 서비스 품질평가 자료

앞서 예보관측비교방법의 단점은 구간별로 예보 서비스 평가에 대한 수치적 장치가 없다는 것이다. 상대평가곡선 방법은 특정구간에 대해 예보 관측 비교방법을 이용하여 예보 서비스 비교평가를 할 수 있다는 장점이 있다. 각 구간별로 대해 경보가 발령된 횟수에 대한 예측 비율인 Hit Rate과 경보가 발령되지 않은 횟수에 대한 예측 비율인 False alarm rate을 계산하여 모든 구간에 대한 값을 산출한다.

$$B/(D+B) : \text{False Alarm Rate} \quad (6)$$

$$A/(A+C) : \text{Hit Rate} \quad (7)$$

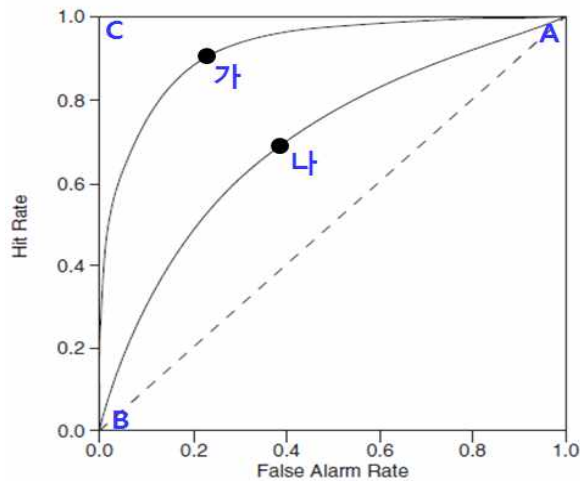


그림 24 상대평가곡선의 비교평가 방법 예시

구간별 H와 F값은 x축과 y축으로 이루어진 그래프를 그릴 수 있으며 각각의 그래프의 모양에 따라 또는 구간에 따라 예보서비스 비교 평가가 가능하다. 그래프가 그림처럼 결정될 경우 A는 H=1, F=1인 지점으로 모든 정보는 예보관에 의해 모두 예측된 정보이며 동시에 모든 정보에 대해 단 1건도 예측되지 못한 경우다. 즉 예보 성공률이 100% 동시에 예보 실패율도 100%인 것으로 예보점수는 없다고 할 수 있다. B점의 경우도 H와 F가 모두 0으로 예보 점수는 없는 영역이다. 반면 C의 경우 H=1이면서 F=0이므로 예보관이 예측된 모든 정보는 항상 경보가 발령되어야 한다는 의미

이다. 즉 예보 성공률이 100%이면서 실패율은 0%인 가장 이상적인 예보 서비스라고 할 수 있다. 따라서 상대평가곡선방법에 의해 결정된 곡선은 모두 좌측 상단인 C영역에 가까울수록 예보 점수가 높게 측정된다. 반면 A와 B을 포함하는 직선은 예보점수가 없는 영역을 나타낸다. 그리고 모든 곡선은 A, B, C의 영역에 분포하게 되므로 각각의 곡선과 직선 AB로 구성되어진 면적을 구해 실제 예보점수를 수치화 할 수 있다. 결국 가장 이상적인 예보 서비스는 A, B, C로 이루어진 곡선으로 면적은 1이 된다.

앞에서 "내일은 비가 온다"라는 예보 서비스에 대한 평가방법에 대해 살펴보았다. 하지만 실제 생활에서는 내일은 비가 올수가 있고 눈이 내릴 수 있고 바람이 세게 분다거나 안개가 나타날 수 있거나 등 다양한 현상이 나타날 가능성이 있다. 그리고 이러한 다수의 정보에 대해 각각 예보 관측 비교 방법을 사용하기에는 너무 많은 시간이 소요된다. 또한 각각의 정보가 서로 연관성이 있어 항상 같이 고려해야 하는 상황이 있을 수 있다. 예를 들어 아침에는 비가 올 것이라 예측되지만 오후가 되면 비와 눈이 동시에 내리는 경우가 예측될 수 있다.

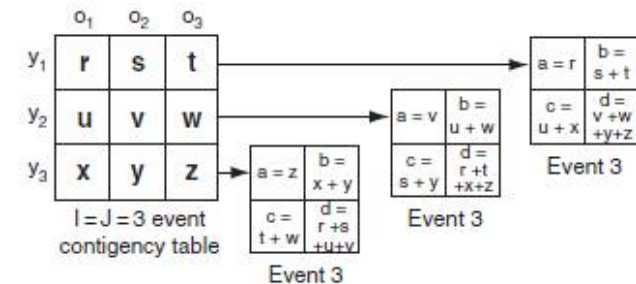


그림 25 변수가 다수인 예보·관측 비교방법

우주전파환경 분야에서도 이런 상황은 예외가 아니다. 예보관이 전파두절 1단계가 예상된다는 정보를 결정했다더라도 실제 태양에서 방출된 X선이 방대하여 전파두절 2단계나 3단계 상황이 발생할 경우 이에 대한 예보 서비스 평가 시 1단계뿐만 아니라 2단계, 3단계에 대해 같이 고려해야 한다. 다시 말해 기존 2x2 형식의 예보관측비교방법 이외에 nxm 형식의 예

보관측비교방법이 나타날 수 있다는 것이다. 이러한 방법을 확장형 예보 관측 비교 방법이라 한다. 확장형 예보관측 비교방법에서 사용되는 예보 서비스 평가 요소는 기존에 사용되었던 예보 실패율, 예보점수, 편향도 모두 그대로 적용된다. 다만 기존 2x2이상의 정보가 발생하므로 각각의 요소에 대한 계산방식이 조금씩 달라지게 된다.

$$\text{예보점수} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p(y_i, o_j) s_{i,j} \quad (8)$$

$$D(j) = \frac{1 - \sum_{r=1}^j p(o_r)}{\sum_{r=1}^j p(o_r)}, \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (9)$$

$$s_{j,j} = \frac{1}{J-1} \left[\sum_{r=1}^{j-1} \frac{1}{D(r)} + \sum_{r=j}^{J-1} D(r) \right], \quad j = 1, \dots, J \quad (10)$$

$$s_{i,j} = \frac{1}{J} \left[\sum_{r=1}^{i-1} \frac{1}{D(r)} + \sum_{r=j}^{J-1} D(r) - (j-1) \right], \quad 1 \leq i < j \leq J \quad (11)$$

예를 들어 그림 24와 같이 3x3형태의 비교표가 작성되었다고 하자. y_1 에 측에 대해 실제 관측 o_1 이 참이어야 하지만 o_2 와 o_3 의 실제 관측상황은 y_1 예측상황과는 무관한 정보로 모두 거짓이다. 다시 말해 예측은 되었지만 실제 관측되지 않는 정보로 이해할 수 있다. 비슷한 방법으로 예측된 정보 y_2 및 y_3 도 실제 관측된 o_1 과 무관한 정보로 모두 거짓이다. 따라서 그림의 $r(y_1, o_1)$ 지점을 중심으로 3x3형식의 표를 2x2형식의 비교표로 전환시킬 수 있다. 같은 방법으로 $v(y_2, o_2)$, $z(y_3, o_3)$ 도 2x2형식으로 전환시켜 단순화시킬 수 있다. 확장형 예보·관측 비교평가에서 예보점수를 구하는 방법은 조금은 복잡하다. 식 (8)을 이용하여 비교적 쉽게 구할 수 있지만 식 (9)~(11)을 추가로 알아야 한다. 특히 식 (10), (11)은 각각 항목에 대한 예보점수 가중치로 작용한다. 두 개의 변수가 일치하는 경우($i=j$) 식 (10)이 적용되며 실제 예측된 정보가 관측되는 상황이 많을수록 가중치는 증가하게 된다. 반면 두 개의 변수가 일치하지 않은 경우 식 (11)이 적용되는데

($j-1$) 항목이 포함되어 예측된 정보가 실제 관측되지 않은 상황이 적을수록 그리고 참인 항목에서 멀어질수록 값은 작아지며 음의 값을 가지기도 한다. 또한 식 (11)을 사용할 때 $s_{i,j}=s_{j,i}$ 이 적용되므로 한 가지 상황만을 가정하여 가중치를 구한다. 아래의 그림은 위의 방법을 이용한 예시를 나타내고 있다.

Full 3 × 3 Contingency Table			Freezing Rain			Snow			Rain		
	o_1	o_2	o_3		o_1 not o_1		o_2 not o_2		o_3 not o_3		
y_1	50	91	71	y_1	50	162	y_2	2364	217	y_3	3288
y_2	47	2364	170	not y_1	101	6027	not y_2	296	3463	not y_3	241
y_3	54	205	3288								2552
			TS = 0.160			TS = 0.822			TS = 0.868		
			$\theta = 18.4$			$\theta = 127.5$			$\theta = 134.4$		
			B = 1.40			B = 0.97			B = 1.01		
			FAR = 0.764			FAR = 0.084			FAR = 0.073		
			H = 0.331			H = 0.889			H = 0.932		
			F = 0.026			F = 0.059			F = 0.092		

그림 26 예보·관측 비교방법의 샘플데이터 예시

		Observed		
		Frz Rain	Snow	Rain
Forecast	Frz Rain	$p(y_1, o_1) = .0079$	$p(y_1, o_2) = .0144$	$p(y_1, o_3) = .0112$
	Snow	$p(y_2, o_1) = .0074$	$p(y_2, o_2) = .3729$	$p(y_2, o_3) = .0268$
	Rain	$p(y_3, o_1) = .0085$	$p(y_3, o_2) = .0323$	$p(y_3, o_3) = .5186$
		$p(o_1) = .0238$	$p(o_2) = .4196$	$p(o_3) = .5566$

$s_{1,1} = 21.14$	$s_{1,2} = 0.13$	$s_{1,3} = -1.00$
$s_{2,1} = 0.13$	$s_{2,2} = 0.64$	$s_{2,3} = -0.98$
$s_{3,1} = -1.00$	$s_{3,2} = -0.98$	$s_{3,3} = 0.41$

그림 27 확장형 예보·관측 비교방법의 예보점수 산출과정

제3절 우주전파센터 품질평가 결과

앞서 우리는 이번 연구에서 적용된 예보 서비스 비교 평가 방법에 대해

알아보았다. 지금부터는 제시된 품질평가 방법을 이용하여 2013년의 예보 서비스에 대한 품질 평가를 실시하고 2012년의 품질 평가 결과에 비교·분석한 결과를 알아보자. 가장 먼저 알아볼 평가방법은 상대평가곡선 방법을 적용한 결과로 우주전파센터와 미국의 SWPC의 2012년 및 2013년 예보 확률값을 기준으로 작성되었다.

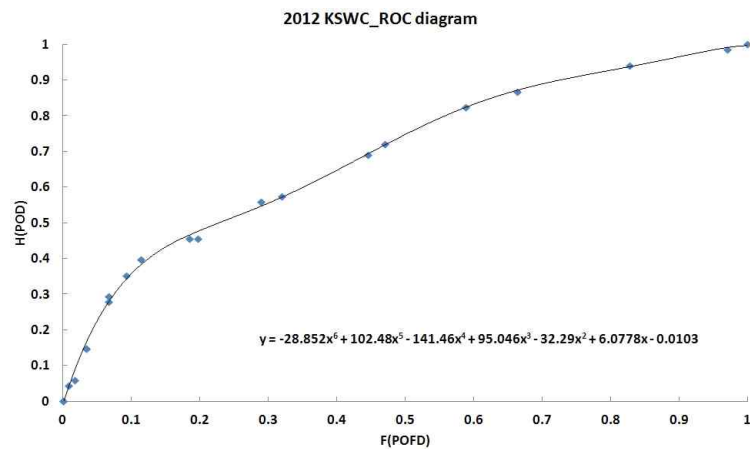


그림 28 2012년도 우주전파센터 상대평가 곡선

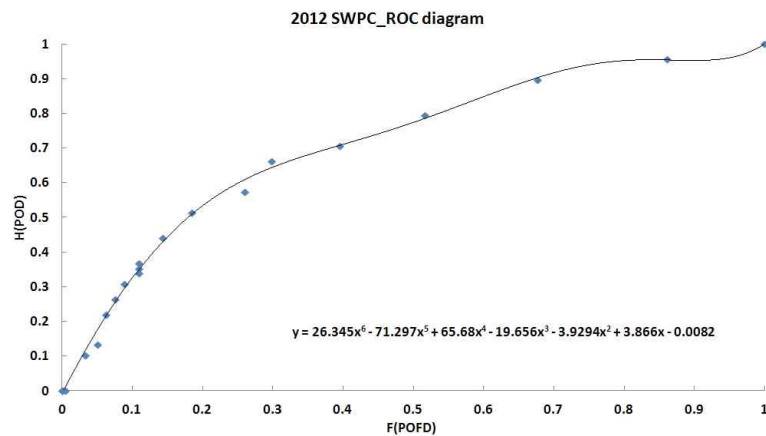


그림 29 2012년도 미국 SWPC 상대평가 곡선

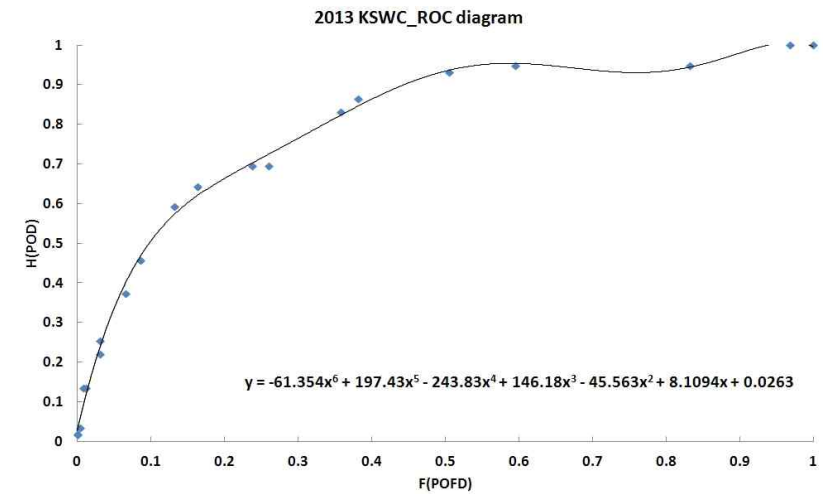


그림 30 2013년도 우주전파센터 상대평가 곡선

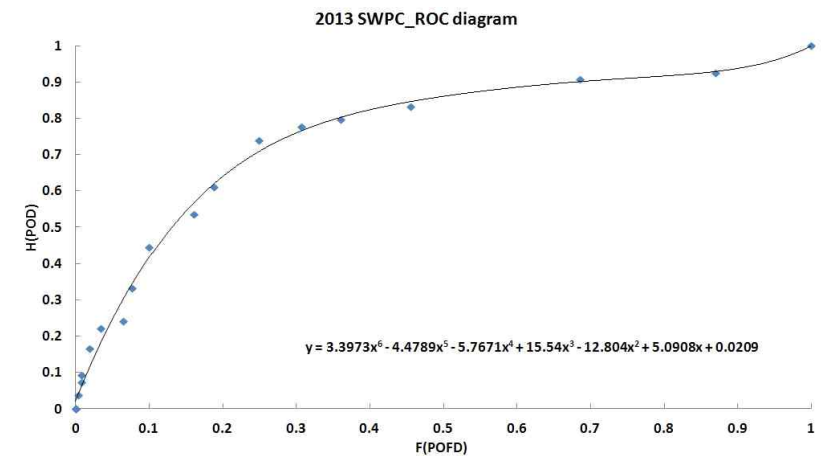


그림 31 2013년도 미국 SWPC 상대평가 곡선

두 기관 모두 2012년과 2013년의 상대평가 결과 좌측상단 방향으로 곡선이 형성되고 있어 예보 서비스가 좋은 것으로 판단할 수 있다. 우주전

파센터의 경우 상대평가곡선에 의한 2012년도 예보점수는 38.6이었으나 2013년에는 62.5로 약 39%가량 상승된 모습을 나타내고 있다.

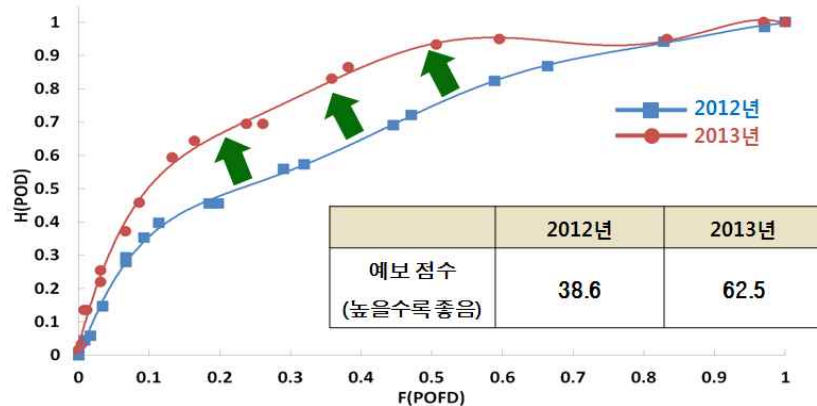


그림 32 우주전파센터의 상대평가 곡선 비교

우주전파센터의 예보점수가 상승한 것은 2013년도 예보 서비스 개선 업무를 통해 예보 서비스에 대한 신뢰도가 향상된 결과로 분석할 수 있다. 특히 ASSA의 경우 태양흑점 폭발 예측에 대한 분석은 이미 2013년 이전부터 예보관의 경험과 그 동안 연구 분석을 통해 기본 틀이 마련되어 있었고 예측된 정보는 다시 통계를 자료에 입력되어 예측 결과로 재생산되는 피드백 시스템이 갖춰져 있기 때문에 이러한 결과를 얻어진 것으로 분석할 수 있다. 또 다른 이유는 예보관의 데이터 분석과 이를 기반으로 하는 예측능력이 향상된 것으로 해석할 수 있다. 현재 우주전파센터에서 예보관 업무를 수행하고 있는 인력은 모두 태양, 행성간 공간, 지구 자기권, 전리권 등의 우주전파환경 전문지식을 보유하고 있으며 이와 관련한 석사 및 박사 학위가 있다. 또한 미국 SWPC와의 꾸준한 인력교류를 통해 선진국에서 수행되고 있는 앞선 기술을 습득함으로써 예보업무를 좀 더 효율적으로 그리고 객관적인 시각으로 수행할 수 있게 되었다. 하지만 상대평가곡선 하나의 결과만으로 이 모든 가능성이 옳다고 할 수 없다. 다른 예보 서비스 평가방법의 결과를 좀 더 분석해 볼 필요가 바로 여기에 있다. 2012년에 수행된 자체연구를 통해 우주전파센터의 예보 서비스가 예보·

관측 비교방법을 통해 처음으로 평가되었다. 당시 예보 실패율은 약 58%로 미국 SWPC보다 높은 수준이었으며 편향도 역시 1.11로 실제 관측에 비해 예측이 과다한 경향이 나타났었다. 이러한 우주전파센터의 예보 서비스 특징은 올해에도 나타나고 있다. 더구나 예보 실패율과 편향도가 작년보다 더 상승한 것으로 나타났다.

표 13. 예보·관측 비교방법을 이용한 우주전파센터 예보 서비스 비교

구 분	예보 실패율	편향도	예보점수 (높을수록 좋음)
2012년	58%	1.11	0.27
2013년	60%	1.26	0.28

2012년과 2013년의 예보점수는 비슷한 상황에서 이러한 차이를 보이는 이유는 예보 편향도에서 찾을 수 있다. 편향도는 전체 관측횟수에 대한 예보횟수 비율로 두 시기 1보다 크게 나타나 한정된 관측값에 비해 예측이 많았다는 의미이다. 이에 비해 미국 SWPC의 편향도는 0.73(2012년)과 0.70(2013년)으로 우주전파센터 보다는 낮게 측정되었다. 우주전파센터의 높은 편향도는 한정된 관측값으로 인해 높은 예보 실패율을 가져오게 된다. 따라서 예보 실패율을 선진국 수준으로 줄이기 위한 방안이 필요하며 예보 확률값을 선정 시 관련 데이터를 좀 더 객관적으로 분석할 수 있는 능력을 키우는 것이 우선과제가 될 것이다. 이는 예보관의 경험이 좌우하는 부분으로 예측모델의 결과와는 별개로 고려해야 할 사항이다. 예보관의 경험은 짧은 시간에 만들어지는 것이 아니며 관련 전문분야 지식이 있더라도 실제 업무 경험이 없다면 무용지물이 될 수밖에 없다. 예를 들어 ‘태양흑점 폭발로 태양입자 유입이 발생한다.’라는 지식을 가지고 있는 예보관이 태양흑점 폭발이 관측되었지만 태양입자 유입이 관측이 예상보다 늦게 나타나거나 태양흑점 폭발이 없었는데도 태양입자 유입이 관측되는 경우 예보관은 이에 대한 후속영향분석에 어려움을 느낄 수밖에 없다. 하지만 경험이 풍부한 예보관이라면 태양흑점 폭발이 어느 규모이며, 어떤 위치에서 발생하였는지, 코로나물질방출이 있었는지, 태양뿔에서 태양흑점 폭발이 발생하였는지 등 그 동안 경험해온 상황들을 이용하

여 후속영향분석을 실시할 것이다. 이러한 예보관의 경험은 비상상황 시 더욱 중요하게 작용할 수 있다. 태양활동으로 지구영향에 대한 분석이 매우 시급한 상황인데 위성이나 지상에서 관측한 데이터가 매우 부족하거나 수집되기 이전 이라고 한다면 신속한 분석과 상황대처가 불가능 할 것이다. 하지만 경험이 풍부한 예보관은 관측데이터가 충분치 않더라도 그 동안의 경험으로 직관적인 예측이 가능하고 실제 관측데이터가 추가로 수집 될 경우 좀 더 쉽고 빠르게 데이터 분석이 가능하여 신속한 예보를 수행 할 수 있게 된다. 다음의 예보 서비스 품질평가는 예보 효율성 방법이다. 예보 효율성은 앞서 언급했듯이 예보의 평균제곱오차와 분산을 이용한 것으로 그 결과는 아래 표와 같다.

표 14. 예보 효율성 비교방법을 이용한 우주전파센터 예보 서비스

구 분	평균제곱오차	분산	예보 효율성 (높을수록 좋음)
2012년	0.150	0.172	0.127
2013년	0.126	0.144	0.125

2012년에 비교하여 2013년의 평균제곱오차와 분산이 감소한 것을 확인할 수 있다. 평균제곱오차가 감소했다는 것은 그 만큼 예측된 정보가 실제 관측값에 많이 접근했다는 것으로 해석할 수 있으며 이는 예보·관측 비교 방법에서 확인했던 예보횟수가 증가하여 그 만큼 평균제곱오차가 감소했을 가능성도 있다. 하지만 실제 예보 효율성은 큰 차이를 보이지 않는다.

표 15. 확장형 예보·관측 비교방법을 이용한 예보 서비스 비교

구 분	KSWC(한국)	SWPC(미국)	SIDC(벨기에)
2012년	0.206	0.212	0.275
2013년	0.235	0.242	0.337

예보 서비스 품질평가를 통해 우주전파센터의 예보횟수가 많아 예보 실패율이 높다는 것을 알 수 있었다. 실제로 미국과 비교를 하면 그 차이를 확인할 수 있는데 2012년에 조사된 자료의 경우 10%~20% 예보구간을 제외하고는 모두 우주전파센터의 예보횟수가 많은 것으로 나타났으며 2013년에서도 20%이상의 예보구간에서 우주전파센터가 더 많이 나타났다.

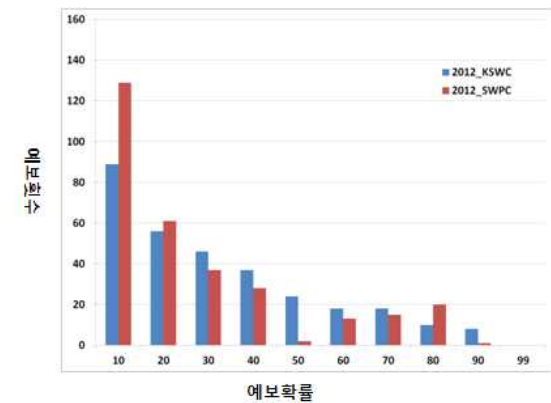


그림 33 2012년 KSWC와 SWPC의 예보횟수 비교

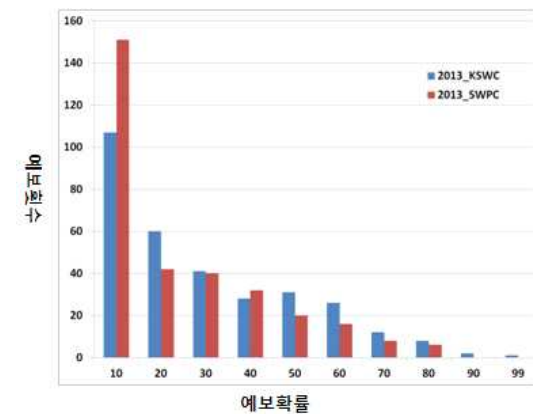


그림 34 2013년 KSWC와 SWPC의 예보횟수 비교

다시 말해 특정 예보에 대해 10% 확률이 예상되었지만 20%로 높게 발표되고 있다는 것이다. 다양한 예보 서비스 평가방법을 통해 우주전파센터의 예보 서비스는 전체적으로 2012년보다 좀 더 높은 예보 점수를 기록하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 예보의 편향도와 예보 실패율이 여전히 높은 상태를 유지하고 있으며 예보 효율성이 비교적 낮은 것으로 평가되고 있었다. 또한 해외의 다른 기관들과 비교 시 비교적 낮은 예보점수를 기록하였다. 이는 예보업무를 수행할 시 예보횟수 또는 예보 확률값이 높게 설정하는 경향이 있어 나타난 결과라고 할 수 있다. 그러므로 해당 이벤트가 실제 발생되었을 때는 그만큼 예보 점수가 올라가는 현상이 나타나지만 반대로 이벤트가 발생하지 않을 경우 예보 실패율이 높아지고 예보 효율성을 떨어지는 결과가 나타나는 것이다.

장기적인 관점으로 우주전파센터의 예보 서비스는 수요자 중심의 예보 서비스와 질적 서비스 향상을 추구해야 한다. 태양활동 자동분석 프로그램이나, 고에너지 입자 및 지자기 교란에 대한 확률 예측 프로그램 개발이 바로 수요자 중심의 예보 서비스 부분이다. 또한 예보의 질적인 향상을 위해서는 예보 서비스의 신뢰도 또는 정확도 향상을 고려할 필요가 있으며 우주전파센터에서는 이를 위해 태양풍 전달모델이나 태양풍 이동경로 모델 등 다양한 모델을 개발하였다.

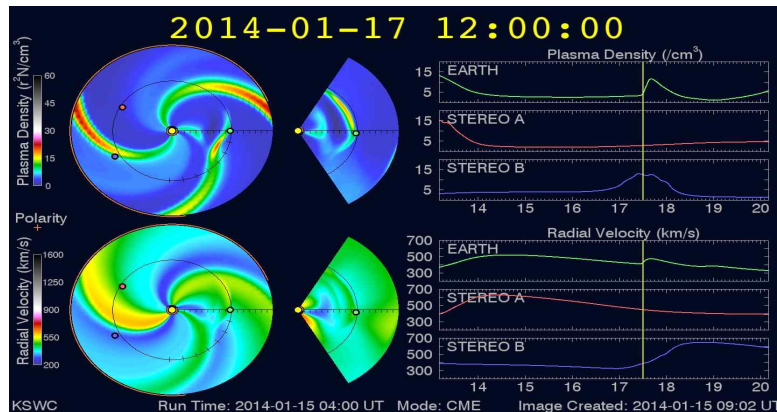


그림 35 태양풍 전달모델(Enlil)에 의한 태양풍 예측

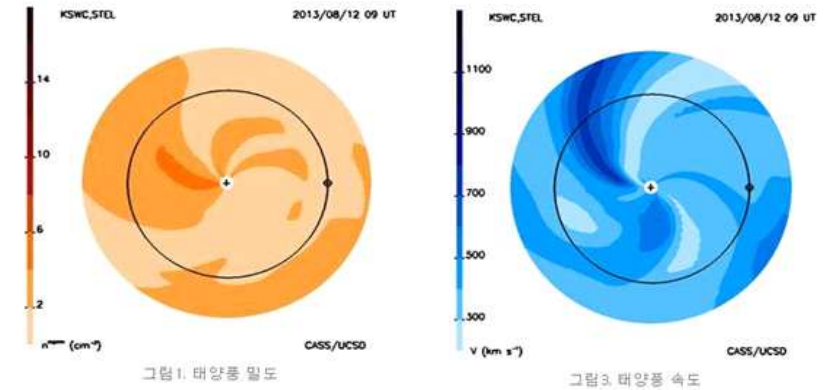


그림 36 태양풍 이동모델(IPS)에 의한 태양풍 예측

하지만 이러한 노력에도 불구하고 이번 연구를 통해 우주전파센터 예보 서비스의 실패율에 문제가 있음을 알 수 있었으며 예보의 실패율을 관리해야 예보 서비스의 질적 향상을 기대할 수 있다. 현재 우주전파센터의 예보 실패율은 약 60% 정도로 선진국보다 높은 상황이므로 다음 태양활동 극대기까지 이를 줄이기 위한 정책마련이 시급하다. 해외 다른 기관에서도 예보 실패율과 비슷한 평균제곱오차, 평균오차 등 다양한 방법을 이용하여 실제 예측한 예보정보가 실제 관측값과 얼마나 차이가 나는지를 평가하여 관리하고 있다.

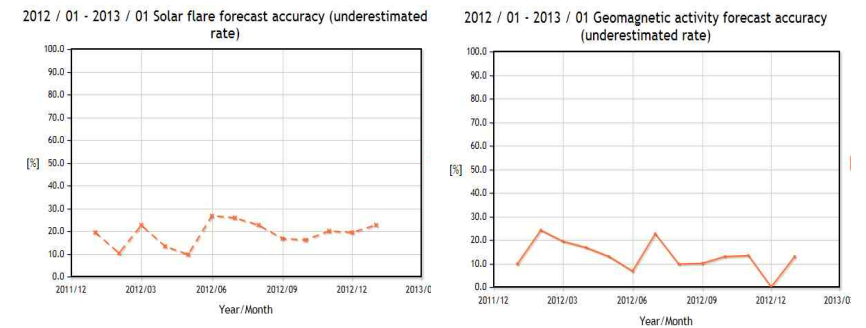


그림 37 일본 NICT에서의 예측에 대한 오차율 평가 자료

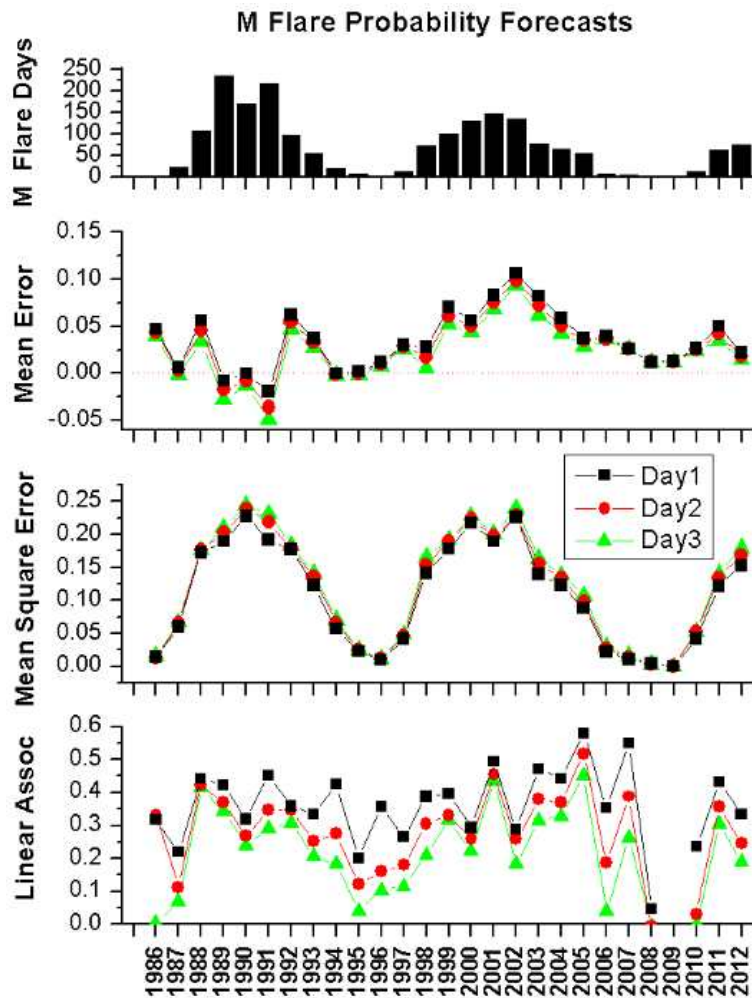


그림 38 미국 SWPC에서의 예측에 대한 오차를 평가 자료

따라서 우주전파센터에서도 예보 실패율 등 예측에 대한 오차율을 꾸준히 점검함으로써 예보 서비스의 신뢰도를 높이는 시스템을 구축해야 한다. 또한 실질적으로 예보 실패율을 줄이기 위한 다양한 정책적인 지원도

필요하다. 예보 실패율은 예보관의 업무능력과 연관성이 있다는 것은 예보관 스스로도 잘 알고 있을 것이다. 비상 상황 시 제한된 관측 데이터가 주어질 경우 지금 당장의 예측정보가 필요한 상황이라면 예보관의 업무능력과 경험적 요소가 같이 필요하지만 시급한 상황이 아닐 경우 예보관의 데이터 분석 능력이 매우 중요하게 작용한다. 따라서 예보관의 업무능력을 향상시키기 위해 예보자료에 작성자를 명시하여 발표하도록 하고 각각의 예보관별 평가시스템을 도입해야 할 것이다. 또한 평가 자료를 이용하여 각종 인센티브나 패널티를 적용하여 예보관 스스로 책임감 있는 예보 업무를 수행할 수 있도록 하여 역량향상을 위한 자기개발이 이루어지도록 유도해야 한다. 개인별 평가시스템은 단순히 개인별 예보 점수가 얼마인지를 알아보기 위한 도구가 아닌 예보관의 업무 능력과 예보관이 수행하는 업무(데이터 관리, 수집 처리)에 대한 특징을 분석할 수 있는 정보를 얻을 수 있도록 해야 한다. 그래야만 예보 업무의 장점과 단점을 분석하여 장점은 증대시키고 단점은 개선할 수 있으며 예보관의 업무와 연계하여 예보 서비스의 신뢰성 및 정확도 향상을 기대할 수 있다. 그리고 이러한 정보는 신입 예보관들의 기술지도 및 교육 시스템의 자료로 활용되어 업무수행에 있어 불필요한 과정을 신입 예보관들에게 알리고 좀 더 정확하고 신속한 데이터 분석을 위한 방법을 스스로 터득할 수 있도록 해야 한다. 결국 평가시스템을 통해 같은 실수 또는 문제점이 반복되지 않는 환류 제도를 구축하는 작업이 필요한 것이다.

제4장 결론

우리는 우주전파센터 개소 이후 제공된 예보 서비스에 대한 품질향상을 위해 각종 태양, 행성간 공간, 지자기 공간, 전리층 등 우주전파환경의 특성에 따라 적합한 예보 모델을 개발·운용하여 예보 서비스 개선 작업을 실시하였고 예보 서비스 품질과 신뢰도 향상을 위해 예보 서비스 품질평가를 실시하였다. 또한 우주전파센터에서 제공하는 예보 서비스가 선진국과 비교하여 수준이 어느 정도인지 알아보기 위해 우주전파센터와 SWPC 간 예보 서비스 품질평가를 실시하였다.

전파두절에 대한 예보 서비스 개선으로 기존에 개발된 태양흑점 자동분석 프로그램(ASSA)에 1996년부터 관측된 태양흑점 분석 자료를 추가하여 흑점 재분류 작업과 통계분석을 통해 ASSA의 알고리즘을 개선하였고 각 흑점별 태양흑점 폭발 가능성을 추가로 표기하도록 하였다. 또한 미국 NASA의 우주전파환경 예측모델 시스템에 정식으로 등록되어 우주전파센터의 국제적 위상을 높이는 계기가 되고 있다. 태양입자 유입에서는 전파두절과 마찬가지로 확률적 기반의 확률 예측프로그램을 개발하였다. 이를 위해 1976년부터 수집된 통계 자료를 이용하여 태양흑점 폭발에 따른 태양입자 유입과 흑점의 위치와 코로나물질방출에 따른 태양입자 유입 등의 연관성을 추가로 분석하여 태양입자 유입이 발생될 가능성을 수치적으로 계산할 수 있도록 프로그램을 개발·구축하였다. 지자기 교란에서도 우주전파센터에서 운용되고 있는 태양풍 전달모델(Enlil)의 결과물인 태양풍의 속도와 밀도를 이용한 지자기 교란 발생확률 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서도 과거에 관측된 태양풍의 속도와 밀도 그리고 이에 대한 지자기 교란 지수의 상관성을 우선적으로 분석하고 확률적 발생률을 계산하여 프로그램의 알고리즘을 마련하였다. 지자기 교란 발생 예측에서는 행성간 자기장의 방향이 중요하다고 알려져 있지만 이번 프로그램 개발에서는 제외하였다. 지금까지 다른 연구를 통해 태양풍 예측모델인 Enlil 모델을 이용한 지자기 교란 예측도 상당한 신뢰성이 있다고 입증되어 이번연구에서는 오직 태양풍의 속도와 밀도만을 가지고 프로그램 개발이 진행되었다.

예보 서비스에 대한 품질평가를 통해 우주전파센터의 예보 서비스가 2012년에 비해 2013년에서 정확도가 좀 더 향상된 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 예보 서비스 개선에 의한 결과로 생각할 수 있으나 예보 횟수의 증가로 예보 점수가 상승된 부분도 있다는 결과를 확인하였다. 하지만 예보 횟수의 결과로 예보의 실패율이 증가되고 효율성에 변화가 없는 단점도 알 수 있었다. 이는 실제 관측된 정보는 한정되어 있지만 예보 횟수 또는 확률을 증가시켜 예보 점수를 높이는 것은 그만큼 오보가 더 많이 나타날 수 있어 효율성이 낮아지는 결과도 가져오기 때문이다. 따라서 우주전파센터에서는 개인별 평가 시스템 등을 이용하여 예보 실패율을 관리하는 정책을 마련해야 할 것이다.

참고문헌

- 1 Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M., "What is a geomagnetic storm?" J. Geophys. Res. Vol. 99 , No. A4 , p. 5771-5792 (93JA02867)
- 2 Gosling, J. T., McComas, D. J., Phillips, J. L., & Bame, S. J., "Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections" J. Geophys. Res., 96, 7831-7839 1991
- 3 Bale, S.D., Reiner, M.J., Bougeret, J.-L., Kaiser, M.L., Krucker, S., Larson, D.E., Lin, R.P., "The source region of an interplanetary type II radio burst. Geophysical Research Letters" 26, 1573, 1999.
- 4 M. S. Wheatland, (2004), A BAYESIAN APPROACH TO SOLAR FLARE PREDICTION, The Astrophysical Journal, 609:1134 - 1139, 2004 July 10
- 5 Xiao YANG, HongQi ZHANG, Yu GAO, Juan GUO, GangHua LIN, (2012), A STATISTICAL STUDY ON PHOTOSPHERIC MAGNETIC NONPOTENTIALITY OF ACTIVE REGIONS AND ITS RELATIONSHIP WITH FLARES DURING SOLAR CYCLES 22~23, Solar Physics, 12 June 2012
- 6 Hogan, R. J., Ferro, C. A. T., Joliffe, I. T., and Stephenson, D. B., Weather and Forecasting, 25, 710, 2010
- 7 Zhang, J., Dere, K. P., Howard, R. A., & Bothmer, V., "Identification of Solar Sources of Major Geomagnetic Storms Between 1996 and 2000" 2003, Astrophys. J., 582, 520
- 8 Yermolaev, Yu.I., Yermolaev, M.Yu., "Statistical relationships between solar, interplanetary, and geomagnetic disturbances,

- 1976 - .2000, 2." Kosm. Issled. 41 (2), 115 (in Russian, translated Cosmic Res. 41. 2003a.
- 9 Zhang, J, -C., Liemohn, M. W., Kozyra, J. U., Lynch, B. J., & Zurbuchen, T. H., "A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years" JGR, 109, A09101, doi:10.1029/2004JA010410, 2004.
 - 10 B. T. Tsurutani et al, "Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of 30-31 October 2003", Journal of Geophysical Research, Vol. 113, 2008
 - 11 Janet Green et al, "Space Weather Conditions at the time of the Galaxy 15 Spacecraft Anomaly", Spacecraft Charging Technology Conference, 2010
 - 12 J. Zhang et al. "Solar and Interplanetary sources of Major Geomagnetic Storms($Dst \leq -100$ nT) during 1996-2005", Journal of Geophysical Research, Vol. 112, 2007