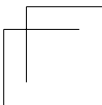
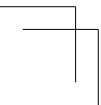


태양입자 유입 예측 모델 개발

2015. 12.



제 출 문

본 보고서를 「태양입자 유입 예측 모델 개발」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 12. 31.

연구책임자 : 권용기(우주전파센터)

연구원 : 김영윤(우주전파센터)

윤기창(우주전파센터)

김재훈(우주전파센터)

정석준(우주전파센터)



요 약 문

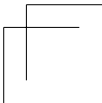
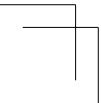
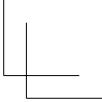
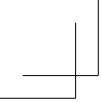
이 연구는 항공 운항 및 위성운용에 가장 큰 영향을 미치는 태양입자(양성자)의 분포를 정확하기 예측하기 위해 선형회귀분석 기법을 이용한 방안을 제시하였다. 태양입자 입자량은 태양흑점 폭발 유무, 폭발 위치, 동반된 CME 방출 여부 등 다양한 인자에 따라 변화하기 때문에, 전세계 주요 우주환경 예·경보기관에서도 이를 과학적이고 정확하게 예측하기 위한 연구를 진행 중에 있다.

이 연구에서는 태양입자 예측모델 개발을 위해 '00~'15년까지의 총 16년간의 장기간의 태양입자 관측데이터를 수집·정제하였으며, 태양입자 최대값 변화 패턴을 가장 잘 기술할 수 있는 함수로 가우시안(Gaussian) 분포 함수를 적용하였다. 또한, 회귀분석법에서 사용되는 주요 파라미터들을 적용하여 개발된 모델의 성능을 분석하였다.

개발된 모델은 시간에 따라 점진적으로 증감하는 데이터에 대해 정확한 예측 결과를 제공하였으나, 태양입자 유입 이벤트(S)와 같이 시간에 따라 급격히 변화하는 데이터에 대해서는 오차(예측값-관측값)값이 크게 증가하는 등 그 변화 경향을 신속히 반영하지 못하는 특성을 보였다. 이러한 모델 특성은 태양입자의 발생유무의 예측보다는 태양입자 이벤트 발생 후 최대값 예측 및 분포 지속성 예측 등 이벤트 경향을 예측하는데 매우 유용할 것으로 사료된다.

이 연구는 그간 인공지능망 기법 등과 같이 경험적 태양입자 예측기법에서 벗어나, 태양입자의 분포와 수준을 보다 과학적이고 정확하게 예측할 수 있는 방안을 제시하였고, 이를 통해 향후 보다 많은 모집단 데이터 분석을 통해, 태양입자 이벤트 상황 발생 시 태양입자 유입량의 최대값 및 종료시점 등을 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 예측모델은 앞으로 항공 우주방사선 산출시스템(SAFE: Safety Aviation Flight Environment) 등과 결합하여, 향후 3일간의 항공 우주방사선량 예측정보 제공 등 주요 수요자가 미리 우주환경 변화에 대응할 수 있도록 지원해 나갈 예정이다.



목 차

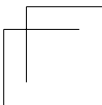
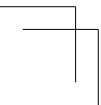
제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 태양입자 개요	4
제3절 태양입자 주요 영향 및 피해분야	6
1. 위성분야	7
2. 항공분야	9
제2장 입력데이터 분석	11
제1절 입력데이터 사전 분석	11
1. 입력데이터 수집 및 정제	11
2. 입력데이터 선정	11
제2절 분포함수 분석	13
제3절 예측기법 분석	14
1. 미래예측기법	14
2. 주요 연구동향	16
제3장 예측모델 개발	19
제1절 과거데이터 분석	19
제2절 예측모델 개발	21
제2절 예측모델 결과	23
제4장 결론	24
참고문헌	25

표 목 차

[표 1] 태양활동 예·경보 단계 및 기준	2
[표 2] 태양입자 유입 단계별 주요 예상 피해	5
[표 3] 위성 SEE현상 별 주요 피해내용	8
[표 4] 위성 위치별 양성자 주요 영향	8
[표 5] 태양활동에 따른 극항로 운항기준	10
[표 6] 입력데이터 특성	11
[표 7] 사용된 태양입자 유입 관측데이터	12
[표 8] 분포함수 별 주요 특징 및 응용분야	13
[표 9] SWPC의 태양입자 예측모델 정확도	16
[표 10] 태양입자 관측데이터 패턴(Type 1~3)	20
[표 11] 관측데이터 별 기술식	21
[표 12] 예측모델 성능분석을 위한 파라미터	22

그림 목 차

[그림 1] 태양흑점 폭발 현상 개요	1
[그림 2] 원자핵 구조	4
[그림 3] 과거 태양입자 유입 발생 횟수 (1975~2014)	4
[그림 4] 주파수별 특성 및 응용분야	6
[그림 5] 양성자의 위성체 피해 과정	7
[그림 6] 태양흑점 폭발에 따른 우주방사선 유입 과정	9
[그림 7] 우주방사선 고도 특성	10
[그림 8] 향후 5년 안에 재난이 발생할 확률 및 피해정도	14
[그림 9] 우주전파센터의 경험적 태양입자 예측모델	17
[그림 10] SWPC의 전자량 예측모델(REFM)	18
[그림 11] 예측모델 결과(예측값 vs 관측값)	23

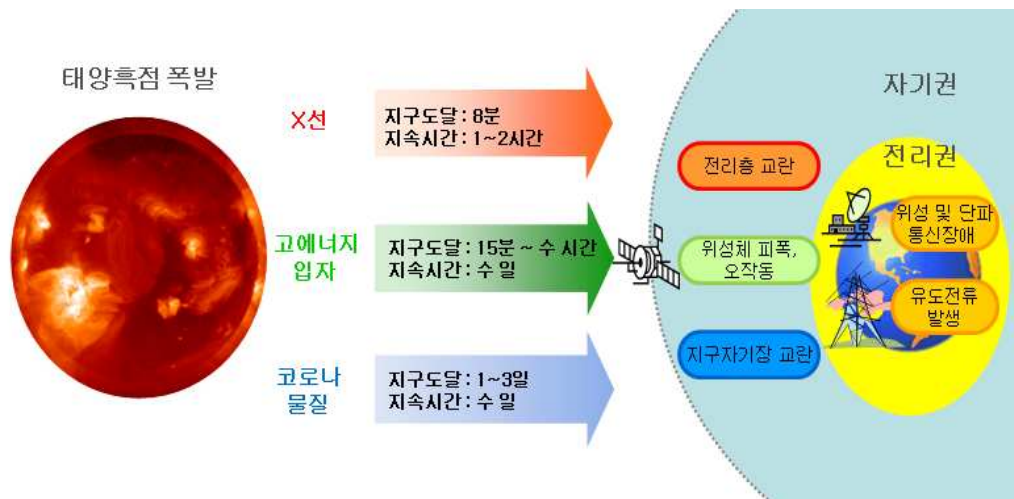


제1장 서론

제1절 연구 배경

태양활동은 태양흑점 폭발, 코로나 홀, 코로나물질 방출등과 같이 다양한 태양 현상을 의미하며, 특히 [그림 1]과 같이 태양흑점 폭발(Solar flare) 등과 함께 X선(X-ray)¹⁾, 고에너지 입자(Solar Energetic Particle)²⁾ 및 코로나물질(CME:Coronal Mass Ejection)³⁾ 등 다양한 물질들을 지구로 전달한다.

이에 따라, 전 세계적으로도 국제우주환경서비스기구(ISES) 등을 중심으로 태양활동 변화 가능성을 사전에 예측하는 예보와, 실시간 변화 정보를 알려주는 정보서비스를 제공하고 있으며, 우리나라는 전파법제61조(전파연구)에 따라, 미래창조과학부 국립전파연구원(우주전파센터)을 중심으로 태양활동 관련 정보를 국내 주요 기관(위성, 항공, 항법, 전력 및 방송통신 분야)에게 제공하고 있다.



[그림1] 태양흑점 폭발 현상 개요

1) 물질 투과성이 매우 높은, 짧은 파장(nm~pm)대의 전자기파(속도 : 약 30만km/s)

2) 양성자, 전자 등 수백만~수억 전자볼트(eV)의 에너지를 가진 입자(속도 : 약 수천~수만 km/s)

3) 태양 대기를 구성하는 양성자, 전자, 헬륨 등(속도 : 약 수백~천 km/s)

태양활동 예정보는 국제적인 기준에 따라 태양흑점 폭발(R), 태양입자 유입(S) 및 지자기 교란(G) 등의 세 항목으로 구성되며 각 항목별 기준값에 따라 [표1]과 같이 세부적으로 1~5단계로 구분된다[1]. 먼저, 태양흑점 폭발과 태양입자 유입 값은 각각 정지궤도(GOES 위성)에서 관측한 X선량(W/m^2)과 10MeV이상의 양성자 입자수(cm^2-s-sr)를 기준값으로 사용하며, 지자기 교란 지수는 전 세계 13개소 지자기 관측소의 평균값을 기준값으로 사용한다.

[표1] 태양활동 예·경보 단계 및 기준

단계	기준		
	태양흑점 폭발 (X선)	태양입자 유입 (양성자)	지자기 교란 (KP지수)
5	2×10^{-3} (X20)이상	10^5 이상	9
4	10^{-3} (X10)이상	10^4 이상	8
3	10^{-4} (X1)이상	10^3 이상	7
2	5×10^{-5} (M5)이상	10^2 이상	6
1	10^{-5} (M1)이상	10 이상	5

이 중, 태양입자는 극항로 운항 항공기 피폭 및 위성 운용 장애등의 피해를 유발하기 때문에, 태양입자 피해에 사전에 대비하고 보다 안정적인 서비스 운용 및 제공을 위해서는 태양입자 량 예측정보 활용이 필수적이다. 이러한 태양입자 유입량 예측은, 태양입자 발생 및 지구유입 매커니즘이 명확하게 규명되어 있지 않고, 유입량에 영향을 주는 요소(태양흑점 폭발 등)들과의 상관성도 분석되지 못한 상황으로, 우주환경의 다른 분야와 달리 예측이 매우 어려운 분야이다.

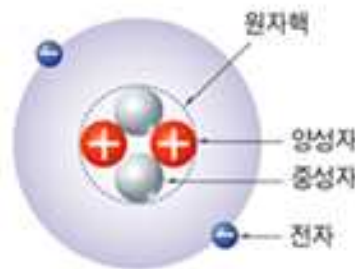
현재, 우주전파센터를 비롯한 대부분의 우주환경 예·경보기관에서는 태양입자 예측에 관한 정보를 제공하고 있으나, 인공신공망 기법 등을 활용하거나, 예보관의 경험적 예측에 의존하는데 예측 정확도가 높지 않은 실정이다.

미 해양대기청(NOAA) 우주환경예측센터(SWPC)에서도 태양입자 량의 예측을 위해 흑점폭발 유형/위치 등을 고려한 모델을 개발하고, 이를 예·경보에 활용하고 있으나, 예측 정확도가 약 60% 수준으로 높지 않은 실정이다[2]. 따라서, 이 연구에서는 가장 예측이 어렵고 주관적 경험에 의존하는 태양입자 예측분야에 보다 과학적이고 정확한 예측기법을 제공하기 위한 방안을 제안하였고, 이를 위해 장기간의 태양입자 관측데이터를 바탕으로, 선형 회귀법을 적용, 향후 태양입자 예측값을 반복적으로 생산하는 방안을 제시하였다.

제2절 태양입자 개요

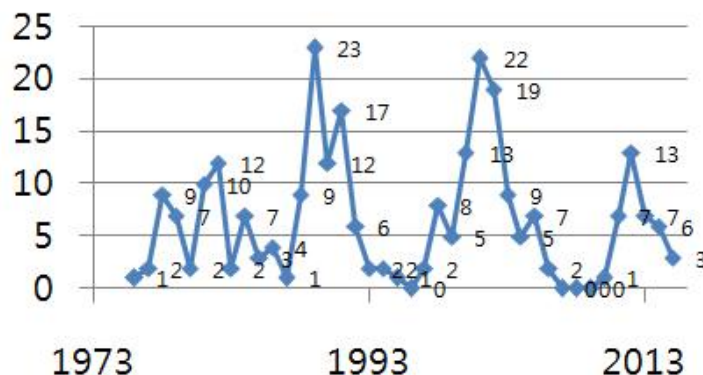
태양방출 물질 중 하나인 태양입자는 주로 고에너지의 전자(electron), 양성자(proton), 중성자(neutron) 및 중이온(heavy ion) 등으로 구성되며, 이 연구에서는 항공 운항 및 위성운용에 가장 큰 영향을 미치며, 우주환경 예·경보 주요 항목인 양성자를 예측하기 위한 방법을 제안하였다.

양성자는 [그림2]와 같이 중성자와 함께 원자핵을 구성하는 입자 중 하나로 태양활동 주기(약 11년)에 따라 1단계 이상은 약 8.1회, 3단계 이상의 약 1.3회 정도 발생하는 것으로 알려져 있다.



[그림2] 원자핵 구조

이 태양입자 유입 이벤트의 발생 빈도는 [그림3]과 같이 태양활동 극대기로 갈수록 증가 경향을 보이는데, 이는 태양입자의 발생원인이 주로 태양흑점 폭발이나 코로나물질방출 등으로 인하여 발생하는 것으로 보인다[3].



[그림3] 과거 태양입자 유입 발생 횟수 (1975~2014)

방출된 고에너지 양성자는 대부분 지구 자기장 및 대기 등의 영향으로 지표면에는 도달하지 못하지만, 지구 자기권(위성)을 지난 후 지구 자기력선을 따라 극 지방으로 유입되기 때문에 [표 2]와 같이 유입량에 따라 위성 및 항공분야에 우주방사선 피해 등 다양한 피해를 유발할 수 있다.

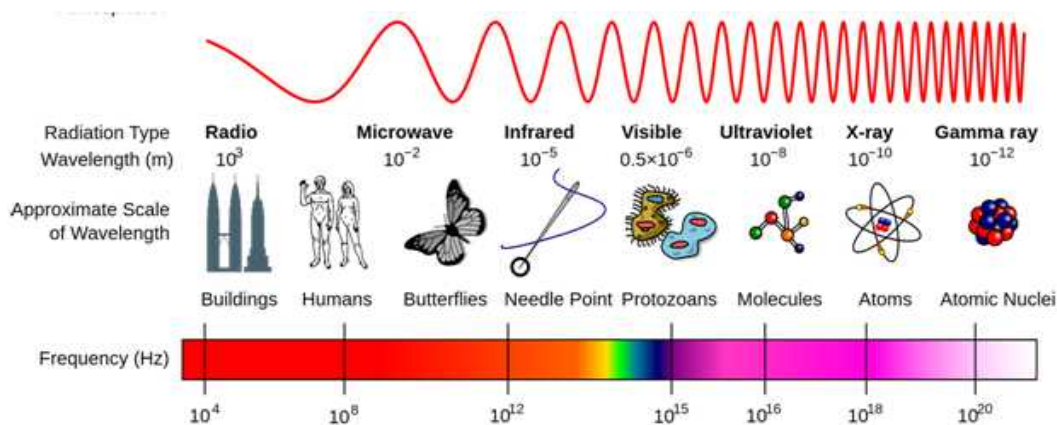
[표2] 태양입자 유입 단계별 주요 예상 피해

등급	예상 피해		관측값	발생 횟수 (1주기 당)
S1	생명체	피해 없음	10	약 50회
	위성시스템	피해 없음		
	기타	극지방에서 HF통신에 약한 장애가 있음		
S2	생명체	고위도에서 비행하는 승객 및 승무원들은 피폭위험도가 증가할 수 있음	10^2	약 25회
	위성시스템	간헐적으로 SEU가 발생가능		
	기타	극지방에서 HF통신과 항법 시스템에 영향을 줄 수 있음		
S3	생명체	우주유영 자제 권고, 고위도에서 비행하는 승객 및 승무원들의 피폭위험도가 증가할 수 있음	10^3	약 10회
	위성시스템	SEU가 발생할 수 있으며 인공위성 장비에 문제가 발생할 가능성이 있음		
	기타	극지방에서 HF신호가 약해질 수 있으며, 위치추적에 어려움 증가 가능		
S4	생명체	우주유영시 방사선 피폭 가능, 고위도에서 비행하는 승객 및 승무원들의 피폭위험 증가	10^4	약 3회
	위성시스템	인공위성의 메모리 및 영상전송에 문제 발생 가능, 태양전지판 효율성 저하		
	기타	극지역에서 HF통신에 장애가 발생할 수 있으며, 수일동안 에러지속 가능		
S5	생명체	우주유영시 높은량의 방사선 피폭 가능, 고위도에서 비행하는 승객 및 승무원들의 피폭위험 증가	10^5	약 1회
	위성시스템	인공위성이 훼손되어 복구가 불가능, 내부기기 오작동 등으로 관측값 오류 및 위치추적, 태양전지판 효율성 저하		
	기타	극지역에서 HF통신이 완전 두절, 위치추적시스템의 장기간 장애 가능		

제3절 태양입자 주요 영향 및 피해분야

지구로 입사하는 고에너지 양성자는 강한 직진특성을 갖기 때문에, 물질 투과성이 매우 높아 방사선 피해를 유발한다. 이러한 특성은 양성자가 존재하는 각종 공간에 우주방사선(Space radiation) 피해를 입히게 되는데, 우주방사선이란 태양 또는 우주로부터 지구로 입사하는 방사선을 의미[4]하며, 항공 고도의 경우 우주방사선 유발인자가 보통 양성자(75%), 알파선(25%), 전자(1%) 등으로 양성자로 인한 영향이 매우 크다.

방사선이란 (그림4)와 같이 주파수가 약 10^{18} GHz 이상의 매우 높은 주파수 대역을 의미하며, 일반적으로 직진 및 투과성이 높아, 인체가 이러한 높은 주파수 대역에 노출될 경우 DNA 등 인체 구성 세포의 변이 및 구성 분자의 전리 등 방사선 피해를 유발 시킬 수 있다.



[그림4] 주파수별 특성 및 응용분야

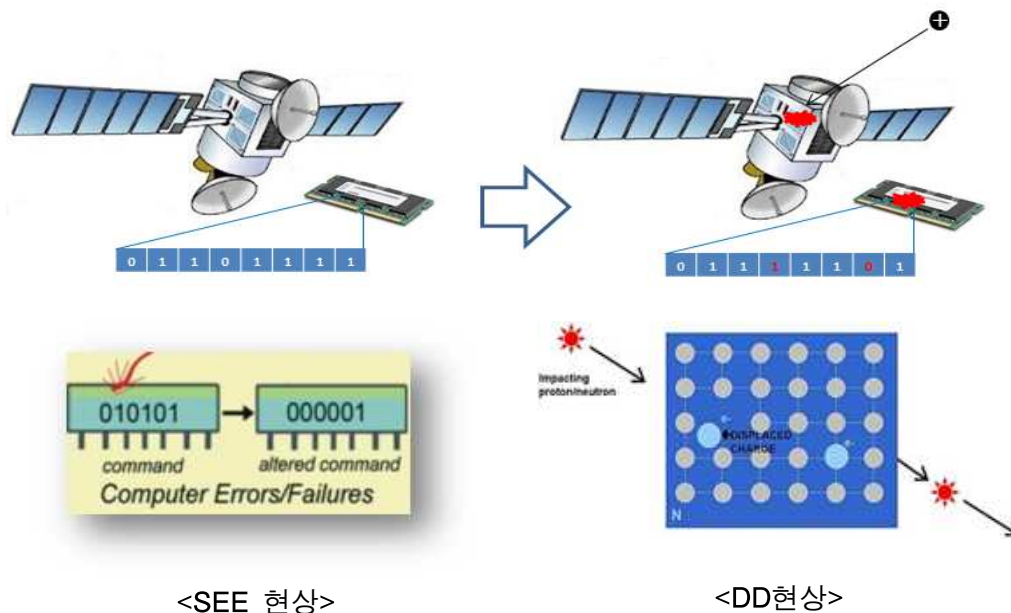
이러한 양성자는 태양에서 방출된 후 지구로 다가오는 도중, 가장 먼저 방송통신 위성 등과 같이 대부분의 정지궤도 위성들이 위치한 지구 자기장과 맞닥뜨리게 되며, 위성의 우주방사선 피폭 피해를 유발하게 된다.

또한, 양성자가 지구 자기장과 충돌 후에는 잔여 양성자들이 지구 자기력선을 따라 국제 항공사들이 연료절감 및 비행시간 단축 등을 위해 많이 이용하는 극 항로 통과지역으로 유입되어, 승객 및 승무원의 우주방사선 피해를 입히게 된다.

1) 위성분야

고에너지 양성자는 [그림5]와 같이 위성 전자부품 및 소자에 침투하여 위성의 영구적 또는 일시적 장애를 일으키는 것으로 알려져 있으며, 장애 분야에 따라 크게 변위손상현상(DD:Displacement Damage)과 단일장애현상(SEE: Single Event Effect)으로 구분된다[5][6][7].

먼저, DD현상은 전자장비에 사용된 물질의 유리구조 교란으로 인하여 태양전지판/트랜지스터 및 스위칭 소자 성능이 감소하는 현상으로, 이러한 피해에도 위성 기본성능 유지를 위해 위성설계 단계부터 여유 마진 설계(power margin), 오류 자동 탐지 및 제어 기법 등을 적용하고 있다.



[그림 5] 양성자의 위성체 피해 과정

또한, SEE는 전자 부품에 고에너지 양성자가 누적됨에 따라 전자장비의 일시적 또는 영구적 장애를 일으키는 현상으로 피해 위치 및 현상에 따라 [표3]과 같이 세부적으로 구분되며, 위성 업계에서는 장비 on-off, 위성체에 오류 자동 탐지 및 제어(On-board correction) 기능 탑재 등의 대응 기술을 통해, 위성 피해에 대비하고 있다.

[표3] 위성 SEE현상 별 주요 피해내용

장애 종류	주요 내용
SEU(Single Event Upset)	반도체 논리상태 오작동
MBU(Multiple Bit Upset)	실리콘 반도체 소자 메모리열 비트 오류
MCU(Multiple Cell Upset)	집적회로내 실리콘 소자 다수 비트 오류
SEB(Single Event Burnout)	전자장비에 고 전압 걸리는 현상
SET(single Event Transient)	논리회로상 소프트적 오류
SEFI(Single Event Functional Interrupt)	전자장비 일시적 기능 저하
SEGR(single Event Gate Rupture)	절연체 내부 손상
SEL(single event Latchup)	전자회로에 과도한 전류가 흐르는 현상

양성자에 의한 위성분야 주요 피해사례를 살펴보면 지난 '89.10월 태양입자 유입으로 인해 Surrey 대학의 UDSAT-2 위성의 궤도가 위성체 내부 시스템 메모리(D-RAM)에 SEU 발생으로 제어되지 못하였다[8]. 또한, 2006년 영국의 Galileo 위성 프로젝트시 태양극대기 기간이 아님에도 불구하고 중궤도위성(MEO)의 운용 장애 등 위성 운용에 많은 영향을 미친다[9].

특히, 방출된 태양입자의 지구 도달 시 지구자기장 영향 등 지구 유입-반사의 일련의 과정에 따라 [표4]와 같이 위성 궤도에 따른 영향이 다소 상이하게 나타나게 되는데, 피해사례 관점에서는 위성분야 단일 장애현상이 변위손상 현상보다 자주 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 고에너지 양성자에 의한 위성 장애사례도 태양극대기로 갈수록 빈번하게 발생하는 경향이 있다고 알려져 있다.

[표4] 위성 위치별 양성자 주요 영향

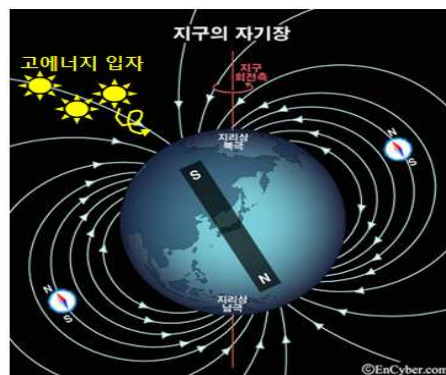
구 분	높이	용도	장애 구분
정지궤도	36,000km	방송, 통신	변위손상, 단일 장애현상
비정지궤도	고(10,000~30,000km)	과학	단일 장애현상
	중(1,000~10,000km)	GPS	단일 장애현상
	저(1,000km이하)	군사, 과학	단일 장애현상

2) 항공분야

항공분야는 우주환경 영향, 특히 태양입자 유입으로 인한 우주방사선 영향을 가장 크게 받는 분야로, 국내(정부 및 항공사) 및 국제기구(ICAO:국제민간항공기구)[10]에서도 우주환경의 영향을 인지하고, 이를 항공 운항 시 반영하는 등 가장 선제적으로 대응하고 있는 분야이다.

양성자에 따른 항공분야 피해는 크게 방사선 노출 및 단파통신 장애 등 두가지 분야로 구분될 수 있는데, 먼저 태양흑점 폭발 시 방출되는 X선, 고에너지 양성자가 지구 극지역으로 유입되면서 전리층의 비정상적 전리현상을 유발하여, 항공기-관제소간 통신 수단인 단파(3~30MHz)대역의 장애를 유발한다.

또한, 흑점 폭발 시 동반된 고에너지 양성자는 [그림6]과 같이 지구 자기력선을 따라 극지역으로 유입(1차 우주방사선 효과)되고, 지구 대기와 충돌하여 방사선 부산물(중성자, 감마선 등)을 생성(2차 우주방사선 효과)하기 때문에, 이에 따라 극 지역을 운항하는 항공기 승객 및 승무원에 우주방사선 피폭 피해를 유발할 수 있다.



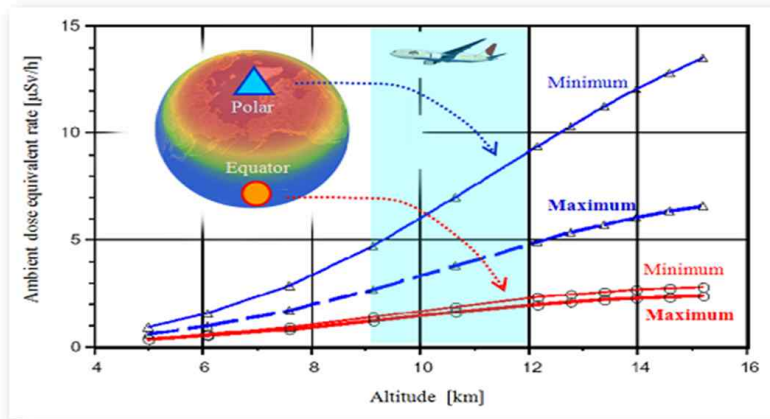
<고에너지 입자(양성자) 극궤도 유입>



<극궤도 방사선 피폭>

[그림6] 태양흑점 폭발에 따른 우주방사선 유입 과정

이러한 우주방사선은 [그림 7]과 같이 일반적으로 항공기 운항고도, 위도가 높을수록, 비행시간이 많을수록 비례하여 증가하는 특성을 보이므로, 생활 주변방사선안전관리법에서는 국제선 노선을 운항하는 항공운송사업자에 대해서도 소속 승무원의 연간 우주방사선량을 관리하도록 규정하고 있다.



[그림기] 우주방사선 고도 특성

이에 따라, 원자력안전위원회에서는 항공기 조종사, 승무원 등 항공 종사자를 방사선 분야 종사자로 규정하고, 국제선 항공 운송 사업자에게 소속 승무원의 연간 우주방사선 노출량을 계산·관리하도록 규정하였는데, 우리나라의 경우 허용 피폭량이 5년간 누적 선량이 100mSv 이내로 규정되며, 이에 따라 항공안전 감독 주무부처인 국토교통부에서는 태양활동 정보를 항공기 운항에 반영하도록 하는 내용을 항공기 운항기술기준에 규정하였다. 이 기술기준에 따르면, (표5)와 같이 3단계 이상의 태양입자 유입(S3) 상황 발생 시 항공기 승객의 방사선 영향 최소화를 위하여 극항로를 운항하는 항공기의 고도를 하향 조정/ 운항 금지 등의 조치를 취하도록 규정하였다[11].

[표5] 태양활동에 따른 극항로 운항기준

우주환경 요소	1단계	2단계	3단계	4단계 이상
태양흑점 폭발	운항가능	운항불가	우회운항	운항금지
태양입자 유입	운항가능	운항가능	고도 조정	운항금지
지자기 교란	운항가능	운항가능	운항가능	운항금지

제2장 입력데이터 분석

제1절 입력데이터 사전 분석

1. 입력데이터 수집 및 정제

예측모델 개발을 위해, 지난 16년(2000~2015)간의 정지궤도(GOES 위성)에서 관측한 태양 양성자 데이터를 이용하였다. GOES 위성은 각각 10 MeV, 50 MeV, 100 MeV 이상의 대역에서 양성자를 관측하는데, 이 연구에서는 [표6]과 같이 태양입자 유입 예·경보로 사용되는 에너지 등급인 10MeV 이상의 양성자 대역을 이용하여, 예측기법을 적용하였다. 관측데이터는 GOES 위성 센서 열화(saturation) 및 위성 SEU 등의 원인에 따라 데이터에 오류(데이터값 : 9999.99)가 나타나며, 이러한 값들은 예측모델 입력을 위해 제거하는 등 사용 데이터를 정제하였다.

[표 6] 입력데이터 특성

공통 특성	내 용
수집 기간	16년(2000~2015)
수집 데이터	양성자(10 MeV 이상)
수집 주기	1시간 최대값
관측범위	$10^{-2} \sim 10^4$ pfu
데이터 정확도	약 78.2%
파일형식	ASCII

2. 입력 데이터 선정

이 연구에 사용된 데이터들은 다음 [표7]과 같다. [표7]에서 알 수 있듯이, 태양입자 관측 최대값은 약 31,700 pfu ('01.11.4.)으로, 지난 태양활동 극대기 기간 중 발생하였으며, 점차 극소기로 오면서 대체적으로 관측 평균값이 점차 낮아지는 경향을 보인다.

또한, 예측모델 개발의 목적이 최대값 분포를 예측하는 것이므로, 명확한 태양입자의 분포 패턴 분석을 위해, 대부분의 평상시 값(10 pfu 이하)은 제외하고 총 20건의 3단계(1,000pfu) 이상의 양성자 값을 이용하였다.

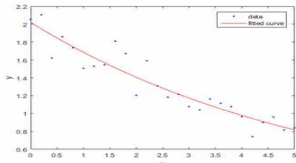
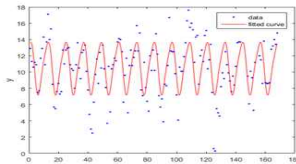
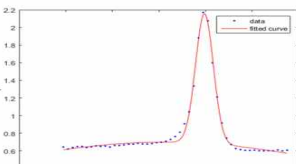
[표 7] 사용된 태양입자 유입 관측데이터

년도	시작일시	최대값 관측시간	관측 최대값(pfu)
2000	7.14. 10:45	7.15. 12:30	24,000
	11.8. 23:50	11.09. 16:00	14,800
2001	4.2. 23:40	4.3. 07:45	1110
	9.24. 12:15	9.25. 22:35	12,900
	10.01. 11:45	10.2. 08:10	2360
	11.04. 17:05	11.06. 02:15	31,700
	11.22. 23:20	11.24. 05:55	18,900
2002	4.21. 02:25	4.21. 23:20	2520
2003	10.28. 12:15	10.29. 06:15	29,500
	11.02. 11:05	11.03. 08:15	1,570
2004	7.25. 18:55	7.26. 22:50	2,086
2005	1.16. 02:10	1.17. 17:50	5,040
	5.14. 05:25	5.15. 02:40	3,140
	9.8. 02:15	9.11. 04:25	1,880
2006	12.06. 15:55	12.07. 19:30	1,980
2012	1.23. 05:30	1.24. 15:30	6,310
	3.07. 05:10	3.08. 11:15	6,530
2013	5.22. 14:20	5.23. 06:50	1,660
2014	1.06. 09:15	1.09. 03:40	1,033
2015	1.21. 21:35	1.22. 19:00	1,070

제2절 분포함수 분석

태양입자 증감패턴을 가장 잘 기술할 수 있는 수식을 찾기 위해, 데이터로부터 함수를 찾는 기법(fitting data to model)을 적용하였다. 특히, 데이터는 분포함수(Distribution function)에 따라, 여러 가지 형태로 기술될 수 있으며, 오차(함수와 과거데이터와의 차이)가 필연적으로 수반되는데, 이 연구의 목적의 태양입자의 최대값 분포를 찾는 것이 목표이므로, 일반적인 평균제곱오차(RMSE:Root Mean Square Error) 방식이 아닌, MME(Minimized Maximum Error)를 기준으로 최대값 또는 최대값 부근에서의 오차를 최소화하는 분포함수를 태양입자 분포함수로 선정하였다. 일반적으로 Matlab(Curve fit)에서 제공하는 분포함수들은 [표8]과 같은 것이 있으며, 관측데이터 특성에 따라 예측모델 개발에 적용 가능성을 분석하였다.

[표 8] 분포함수 별 주요 특징 및 응용분야

함수 구분	기술식	주요특징 및 적용분야
 <Exponential>	$y = ae^{bx} + ce^{dx}$	·초기값에 따라 향후값이 결정되는 변화량 기술 ·방사선 반감기 계산 등
 <Fourier Series>	$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_j \sin(iwx)$	·주기적 신호 변화 기술 ·전파 전달 특성 등
 <Gaussian>	$y = \sum_{i=1}^n a_i e^{[-(\frac{x-b_i}{c_i})^2]}$	·최대값 산출 ·방사선 속 계산 등

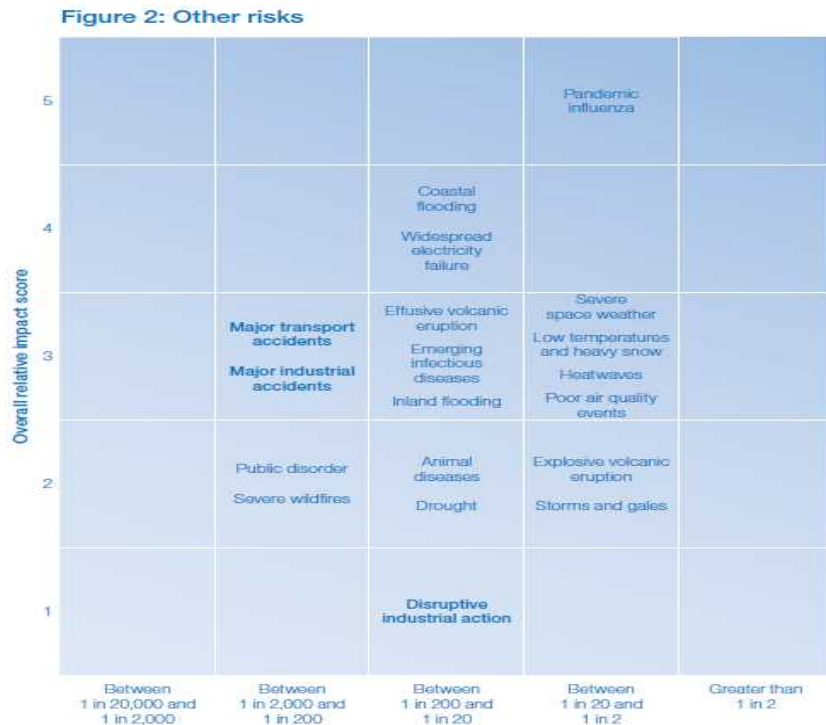
제3절 예측기법 분석

1. 미래예측기법

미래를 예측하는 방법은 참조데이터 유무에 따라 크게 정성적/정량적으로 구분되며, 먼저 정성적 예측기법은 참조 데이터가 없는 경우 사용되는 미래 예측기법으로, 흔히 전문가 평가에 의존하는 델파이 기법으로 대표될 수 있다.

이 기법은 미래를 예측하는데 이용되는 현재 데이터가 존재하지 않기 때문에, 신규 시장 진입, 미래 기술 분석 등 통찰력 있는 예측을 제공할 수 있는 장점이 있는 반면, 이러한 기술들을 평가하는 전문가 집단의 주관적 경향에 따라 결과값이 달라지는 단점이 있다.

영국은 [그림8]과 같이 지난 2013년 델파이 기법을 통해, 재난별 발생확률 및 사회 영향정도를 분석하였는데, 향후 5년안에 우주전파재난(Space Weather risk)이 발생할 확률을 약 5단계 중 4단계(3단계 : 홍수)로, 그로 인한 사회피해 정도를 5단계 중 3단계(2단계 : 태풍)로 분석하였다[12].



[그림 8] 향후 5년 안에 재난이 발생할 확률 및 피해정도

반면, 정량적 기법은 과거~현재 데이터의 변화량 또는 경향 등을 바탕으로 데이터의 향후 분포정도를 예측하는 기법으로, 증시 예측 등 다양한 분야에 이용되는 기법이다.

일반적으로 데이터의 경향을 추정하는 방법으로는 평균, 가중평균 및 추세 분석 등과 같이 시계열 기법과 선형 회귀분석, 다항회귀분석 등과 같은 인과형 분석 등으로 구분된다.

이 연구에서 사용되는 태양입자 데이터는 앞 장에서 기술한 바와 같이, 시계열 데이터로서, 미래값($n+1$)이 현재값(n)에 기반하는 특성을 보이므로, 선형회귀분석법을 적용하여 예측모델을 개발하였다.

2. 주요 연구동향

우주환경 분야에서 현재 데이터(n)를 바탕으로 미래값(n+1)을 유추하는 방법은 그동안 재귀필터를 이용한 선형회귀(linear prediction) 방법과 경험적(machine learning) 방법 등을 주로 이용해 왔다.

선형방법은 적응형 필터(adaptive filter)를 바탕으로, 함수 등 데이터의 분포를 나타내는 수식을 쉽게 구성할 수 없는 반면에, 일단 구성된 식에 대해서는 오차 보정 등의 모델 고도화 작업이 용이하다는 장점이 있다.

또한, 경험적 방법은 장기간의 방대한 데이터를 바탕으로, 과거데이터와 비교하여 반복적으로 예측값을 생산해 내긴하지만, 예측모델을 구성하는 식을 알 수가 없어, 변화하는 모델에 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. 각각의 방법을 예측기법을 적용한 예측모델을 살펴보면 다음과 같다.

2.1) 경험적 예측모델 기법

경험적 예측모델 기법은 현재 데이터의 분포값을, 과거 장기간의 누적 데이터와 비교분석하여, 향후 예측값을 찾아내는 방식으로, 일반적으로는 모델정확도가 누적 데이터량과 비례하는 경향이 있으며, 가장 대표적인 방법으로 인공신경망(neural network) 기법이 있다.

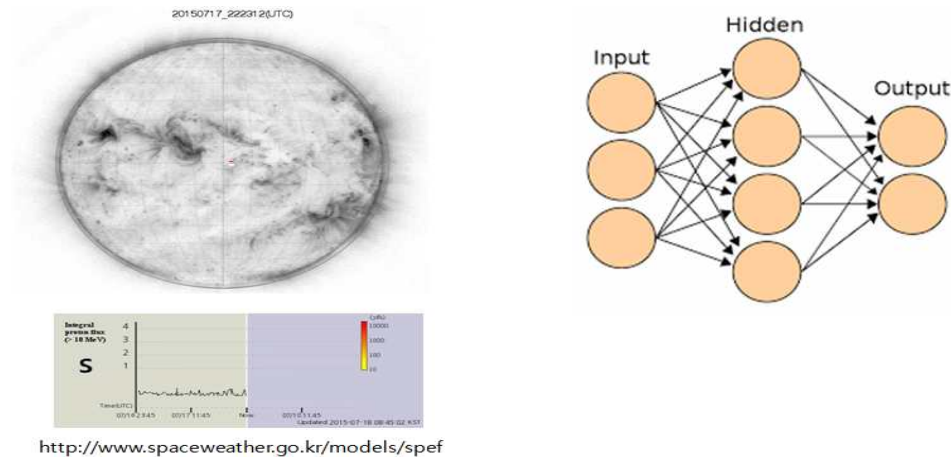
실제 예·경보 업무에 활용되고 있는 미 SWPC의 양성자 예측모델의 경우, 입력인자로 GOES 위성의 X선 데이터를 기반으로 태양흑점 폭발 강도 및 위치를 분류하고 이에 따른 양성자 증가 경향에 대한 통계분석을 통해 미래값을 산출하는 형식으로, 모델 정확도는 표(9)와 같이 약 57.8% 수준으로 알려져 있다.

[표 9] SWPC의 태양입자 예측모델 정확도

관측/예측	S0	S1	S2	S3	S4	TOTAL
S1	2	48	17	1	0	68
S2	0	12	19	5	2	38
S3	0	3	5	10	2	20
S4	0	1	5	2	1	9
TOTAL	2	64	46	18	5	135

반면, (그림9)와 같이 우주전파센터가 지난 '14년 개발하여 사용하고 있는 태양입자 예측모델은 장기간의 태양입자 관측 데이터를 바탕으로, 흑점 폭발 등급 및 폭발 위치에 따른 양성자 증가패턴을 인공지능망 기법을 적용, 과거 데이터와 비교하여, 예측값 산출되는 프로그램이다[13].

이 모델의 장점은 누적 데이터가 확보되면, 현재값을 바탕으로 예측값을 비교적 쉽고 지속적으로 산출해 낼 수 있고, 정확도가 누적 데이터량에 비례하는 특징이 있지만, 과거값과 비교할 수 없는 데이터의 경우 정확한 예측값을 생산해 내지 못하며, 과거-현재값을 기술하는 관계식을 구성할 수 없어 (Hidden layer 부분), 모델의 변화특성 분석 등 모델의 수정이 불가능하다는 단점이 있다.



<http://www.spaceweather.go.kr/models/spwf>

<센터가 개발한 경험적 태양입자 예측모델> <인공신경망 모델의 입-출력 구조>

[그림 9] 우주전파센터의 경험적 태양입자 예측모델 및 개발 원리

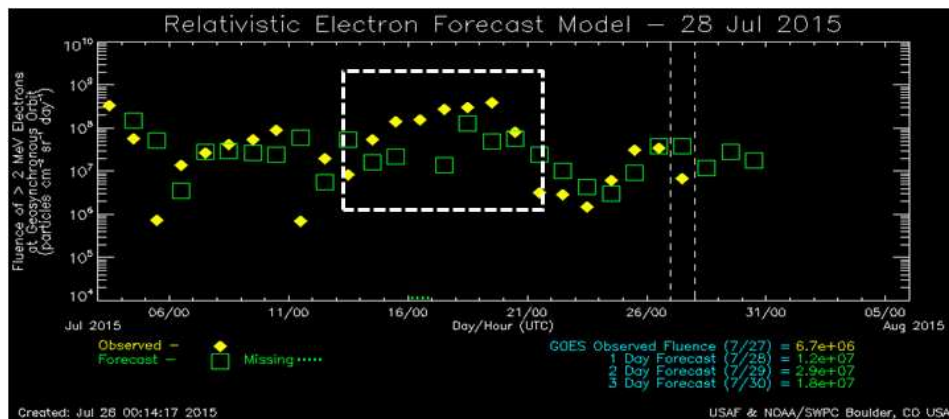
2.2) 선형회귀(linear regression) 기법

선형회귀 기법은 예측값을 결정하는 다양한 변수와의 상관관계를 통해 식을 구성하고, 향후 예측값을 이 상관관계로부터 유추하는 방식이다. 우주환경 분야에서는 다양한 지자기 지수(Kp, Dst) 등으로부터 전자량을 유추하는 방법이 가장 대표적인데, [그림10]과 같이 미국 SWPC가 개발한 전자량 예측모델(REFM)의 경우, ACE 태양풍속도 및 지자기 교란지수등의 입력값을 바탕으로 향후 3일간 2MeV

이상의 전자량을 예측하는데, 모델 정확도는 약 80%수준을 보인다. 이러한 선형회귀식의 경우 모델 식을 잘 구성하면, 매우 안정적으로 미래값을 연속적으로 생산해 낸다는 장점이 있다[14].

그러나, 미래값을 예측하는데 사용되는 다른 인자 등의 값이 감소할 경우, 미래값에도 그대로 영향을 주기 때문에 명확하게 전자량이 증가하는 경우에도 이러한 증가패턴을 잘 반영하지 못한다는 단점이 있다.

예를들어, 일본 NICT에서는 이러한 주요 파라미터에 따른 오류를 보정하고자 보다 많은 입력인자와 kalman filter 방식을 이용하여 정지궤도에서의 전자량 예측연구[15]를 통해, 예측 오차값이 실제 관측값 대비 약 30% 수준내외로 보다 정확도가 향상된 모델을 개발하는등 우주환경 분야에서도 가장 많이 이용되는 미래예측 기법이다.



[그림10] SWPC의 전자량 예측모델(REFM)

제3장 예측모델 개발

제1절 과거 데이터 분석

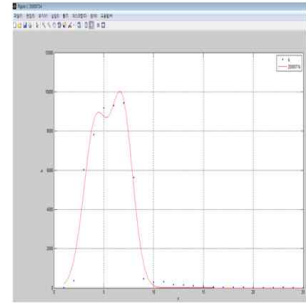
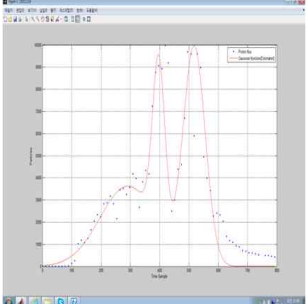
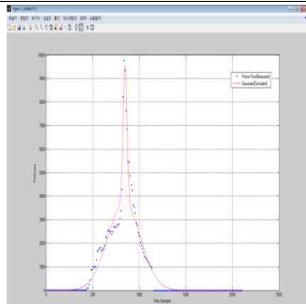
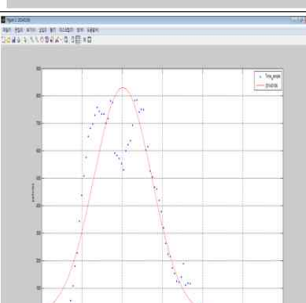
이 연구에 사용된 태양입자 데이터는 증가 및 감소 경향에 따라 (표10)과 같이 크게 세 가지 경향(Type1~3)으로 분류될 수 있다. 다만 Type 1과 2는 관측데이터 분석 여부 및 적용 함수에 따라 상이하게 분류될 경우가 있는데, 이러한 경우에는 관측데이터로부터 도출된 분포함수의 최대값을 가장 잘 설명할 수 있는 함수를 기준으로 분포Type을 분류하였다.

또한, 태양입자 데이터는 시간순으로 변화하는 시계열 데이터(Time series)로서, 선형적(linearity) 분포를 보이기 때문에, 예측값은 현재값에 기반한 값으로 정의하였다. 또한 각 데이터로부터 분석된 분포데이터는 최대값을 기준으로 점차 감소하는 특징을 보이는 가우시안(Gaussian) 분포특성을 보이며, 이로부터 획득된 관측데이터의 총합($n=20$)은 다음 (식1) 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 따라 정규분포를 보이는 등 개발된 모델이 전체 태양입자 데이터 변화량을 대표하고, 안정적으로 운용될 수 있는 특징이 있다[16].

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \approx N(0, 1) \quad (\text{식1})$$

where, μ : 평균, σ^2 : 분산, n : 표본 크기, \bar{X} : 표본평균

[표 10] 태양입자 관측데이터 패턴(Type 1~3)

패턴	경향	관측일자	관측데이터
Type 1	(정상)→증가→감소	2000.7.14.	
Type 2	(정상)→증가→감소→(이벤트) →증가→감소	2001.9.24.	
Type 3	(정상)→증가→(이벤트)→증가 →감소	2001.11.4.	
Type 1 or 2	(정상)→증가→감소 or (정상)→증가→감소→(이벤트) →증가→감소	2014.1.6.	

또한, 개발된 예측모델의 통계적 유의미성 검증 및 성능분석을 위해, 각 함수의 특징과 신뢰도를 결정 파라미터들을 (표12)와 같이 적용하였다.

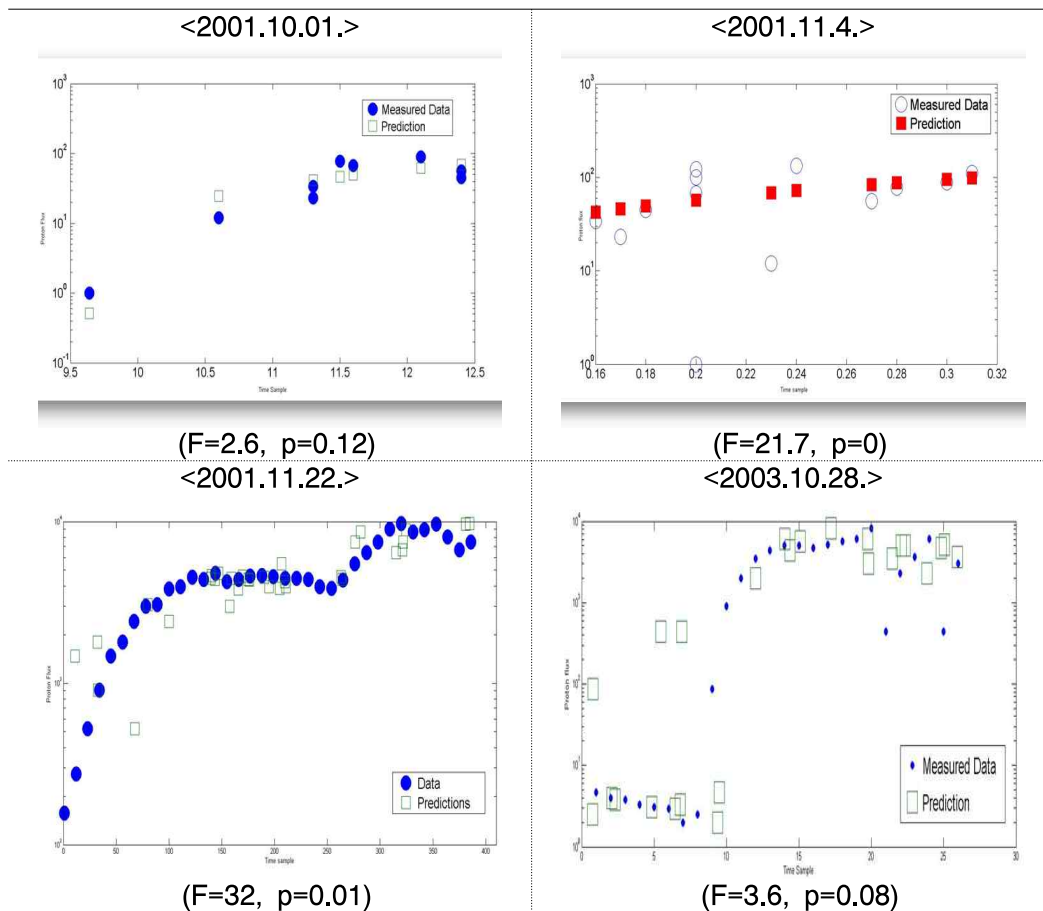
[표 12] 예측모델 성능분석을 위한 파라미터

주요 파라미터	정의
DF	자유도(Degrees of freedom for each Term)
$F(\frac{MeanSq(X_i)}{MeanSq(Error)})$	F-statistic value
P value	가설지지도(hypothesis test on the coefficient of the corresponding term in the linear model)

제3절 예측모델 결과

주요 이벤트별 예측결과와 실측 결과를 비교하여 다음 (그림 11)에 나타내었다. 예측모델의 성능은 태양입자 유입의 분포 특성에 따라 그 정확도가 달라지는데, 예를들어 시간에 따라 천천히 변화하는 데이터 또는 선형적 분포를 갖는 데이터에 대해서는 정확도가 매우 높은 반면, 급격한 태양입자 양의 증가 (정상시⇒상황시) 또는 비선형적 데이터에 대해서는 예측모델이 관측데이터의 패턴을 잘 반영하지 못한다는 것을 알 수 있다.

이러한 예측모델의 성능 특성은 갑작스런 태양입자 유입의 증가 예측 보다는, 태양입자 유입 상황 진행 시 발생 기간 및 최대값 등 분포량을 예측하는데 유용하게 활용 될 것으로 생각된다.



[그림 11] 예측모델 결과(예측값 vs 관측값)

제4장 결론

이 연구에서는 항공운항 및 위성운용에 영향을 미치는 태양입자(양성자) 분포량 예측 모델을 과거 데이터로부터 분포 함수를 구현하는 회귀분석방법을 통해 개발하였다.

태양입자 데이터의 분포양상 분석을 위해, 지난 '00~'15까지의 총 16년간의 관측데이터를 수집하였으며, 이 중 관측 최대값 패턴 분석을 위해 태양입자 유입 3단계(S3) 이상의 관측데이터를 사용하였다.

관측데이터를 가장 잘 기술할 수 있는 함수를 찾기 위해 Matlab에서 제공하는 다양한 함수들을 적용·분석하였고, 특히 태양입자량의 최대값(Maximum)을 찾기 위해, 가우시안(Gaussian) 분포함수를 적용하였다.

이 연구에 사용된 태양입자 데이터는 16년간(2000~2015) 장기간의 데이터이지만, 3단계 이상의 태양입자 관측값이 20건에 불과하여 개발된 태양입자 유입 분포함수에 일반성을 부여하기 다소 어려운 상황이므로, 향후 1단계 이상의 관측데이터까지 포함하는 등의 보완연구 진행이 필요할 것으로 보인다.

개발된 모델은 시간에 따라 점진적으로 증감하는 데이터에 대해서는 정확도 높게 예측하는 특성을 보였으나, 급격한 태양입자 유입 이벤트에 대한 데이터에 대해서는 오류가 크게 나타나는 등 그 변화경향을 신속히 반영하지 못하였다. 이러한 특성은 태양입자의 발생유무 예측보다는 이벤트 발생 후 최대값 및 태양입자 분포 수준 지속성 예측 등 이벤트 경향을 예측하는데 매우 유용할 것으로 사료된다.

이 연구를 통해, 위성운용 및 항공운항 시 가장 큰 영향을 미치는 태양입자를 보다 정확하고 과학적으로 예측하게 되었으며, 앞으로 항공 우주방사선 산출시스템(SAFE: Safety Aviation Flight Environment)과 결합하여, 향후 3일간의 항공 우주방사선량 예측정보 제공 등 주요 수요자가 우주전파환경 변화로 인해 신속히 대응할 수 있도록 지원해 나갈 예정이다.

또한, 수행된 연구결과는 현재 우주전파센터가 제공하고 있는 예·경보서비스에 이벤트 상황 시 태양입자 유입량의 최대값 및 종료시점 등을 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] <http://www.swpc.noaa.gov/>
- [2] Balch, "SEC proton prediction model:verification and analysis", Radiation Measurements, Vol30, issue3, pp231-250, 1999,
- [3] <http://satdat.ngdc.noaa.gov/>
- [4] 원자력안전위원회, "생활주변방사선 안전관리법[법률 제12664호]". 2014.5.21.
- [5] T.P. O'Brien, "SEAES-GEO: A spacecraft environmental anomalies expert system for geosynchronous orbit", SPACE WEATHER, VOL. 7, 2009.
- [6] Royal Academy of Engineering, "Extreme space weather:impacts on engineered systems and infrastructure", pp12-13, 2013.
- [7] National Research Council, "Severe Space Weather Events-understanding societal and economic impacts", pp24-25, 2008.
- [8] Underwood, C. I. "Single Event Effects in Commercial Memory Devices in the Space Radiation Environment, PhD thesis, University of Surrey, Guildford, 1996.
- [9] Ryden, K. A., P. A. Morris, and A. D. P. Hands, "Radiationmonitoring in Medium Earth Orbit over the Solar minimum period", 2008.
- [10] ICAO, "Concept of Operation for space weather information in support of international air navigation", 2013.
- [11] 국토교통부 "운항기술기준"
- [12] Cabinet Office " National Risk Register of Civil Emergencies", pp12-13, 2015.
- [13] <http://spaceweather.go.kr/>
- [14] D.N.Baker, "Linear Prediction Filter Analysis of Relativistic Electron Properties ar 6.6Re", Journal of Geophysical Research, Vol 95, No.9, 1990.

- [15] K.Sakaguchi, "Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model", Space Weather, Vol11, issue2, pp79-89, 2013
- [16] Oliver Johnson, "Information Theory and The Central Limit Theorem", Imperial College Press, 2004.



태양입자 유입 예측 모델 개발



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 : 979-11-5820-038-1 < 비 매 품 >

주 의

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

