

고에너지 양성자에 대한 인공위성 영향 연구

2016. 12.



국립전파연구원

National Radio Research Agency

제 출 문

본 보고서를 「고에너지 양성자에 대한 인공위성 영향에 관한 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2016. 12. 31.

연구책임자 : 공 윤(우주전파센터 연구기획팀)

연구원 : 윤기창(우주전파센터 연구기획팀)

최장석(우주전파센터 연구기획팀)

채진이(우주전파센터 연구기획팀)

김동규(우주전파센터 연구기획팀)

요 약 문

이 연구는 항공 운항 및 위성운용에 가장 큰 영향을 미치는 태양입자(양성자)와 위성장애와의 상관성을 분석하여 고에너지 양성자 위험 기준값을 제시하였다. 태양입자 입자량은 태양흑점 폭발 유무, 폭발 위치, 동반된 CME 방출 여부 등 다양한 인자에 따라 변화하기 때문에, 전세계 주요 우주환경 예·경보 기관에서도 이를 과학적이고 정확하게 분석하는 연구가 진행 중에 있다.

이 연구에서는 태양입자와 위성장애와의 상관성을 분석하기 위해 1973~1994년까지의 장기간 태양입자 관측데이터와 인공위성 피해사례를 수집·정제하였으며 태양입자와 위성장애 관계의 강도를 상관관계(Correlation Coefficient)로 나타내었다.

인공위성의 피해사례와 태양입자 간의 관계를 분석하기 위해 고에너지 양성자가 위성체에 미치는 피해 유형을 분류하고 이를 진단하였다. 또한, 피해 원인별 분석을 통한 장애 유형을 조사하였으며, 고에너지 양성자 값에 따른 위성체 손상과의 연관성도 분석하였다.

이 연구에서는 고에너지 양성자가 위성체에 미치는 영향을 알아보기 위해 X-선과 전자 플럭스 값도 함께 비교하였다. 위성체의 손상으로부터 5일전, 3일전, 1일전의 태양활동과 입자의 양을 함께 대조하여 상관성을 분석 하였고 그 결과는 앞으로 고에너지 양성자 예측모델 등과 결합하여, 위성분야 예·경보 서비스 제공, 전 지구 위성 위험도 예측 모델 개발에 활용 등 수요자가 미리 우주환경 변화에 대응할 수 있도록 지원해 나갈 예정이다.

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구배경	1
제2절 태양입자 개요 및 영향	3
 제2장 고에너지 양성자의 위성체 피해분석	6
제1절 데이터 수집	6
제2절 수집데이터 정제	9
제3절 주요 피해유형	10
 제3장 고에너지 양성자의 위성 영향 분석	15
제1절 입자 데이터 특성	15
제2절 궤도별 위성 장애 분석	19
제3절 고에너지 양성자 이벤트 발생일 기준 위성장애 상관성 분석 ..	22
제4절 피해 유형별 위성 장애 현상	24
 제4장 결론	25
 참고문헌	26

표 목 차

[표 1] 태양활동 예·경보 단계 및 기준	2
[표 2] 태양입자 유입 단계별 주요 예상 피해	3
[표 3] 위성 장애 현상 분류	6
[표 4] 위성 장애 현상 진단	7
[표 5] 위성 장애 원인 및 결과	9
[표 6] 위성 위치별 양성자 주요 영향	14
[표 7] 태양입자 관측 데이터 특성	15
[표 8] 태양입자 유입 관측 데이터	16
[표 9] 태양입자 유입 관측 데이터	23
[표 10] 위성 장애 진단	24

그 립 목 차

[그림 1] 태양흑점 폭발 현상 개요	1
[그림 2] 원자핵 구조	3
[그림 3] 과거 태양입자 유입 발생 횟수 (1975~2014)	3
[그림 4] 우주방사선 특징	4
[그림 5] 양성자의 위성체 피해 과정	10
[그림 6] SEU 이상 현상 종류와 그에 따른 분류	12
[그림 7] 실리콘 재질 내부에서 발생된 DD로 인한 결함	13
[그림 8] 위성 장애 분포 지도	19
[그림 9] 위성 장애 분류(왼쪽)와 위성 장애 진단(오른쪽)	20
[그림 10] 우주환경변화 후 위성 장애 발생	22

제1장 서론

제1절 연구 배경

태양흑점 폭발 및 코로나물질 방출(CME:Coronal Mass Ejection)¹⁾ 등 급격한 태양활동은 전자, 양성자 등 고에너지 입자들을 포함한 다양한 물질들을 지구로 전달한다.

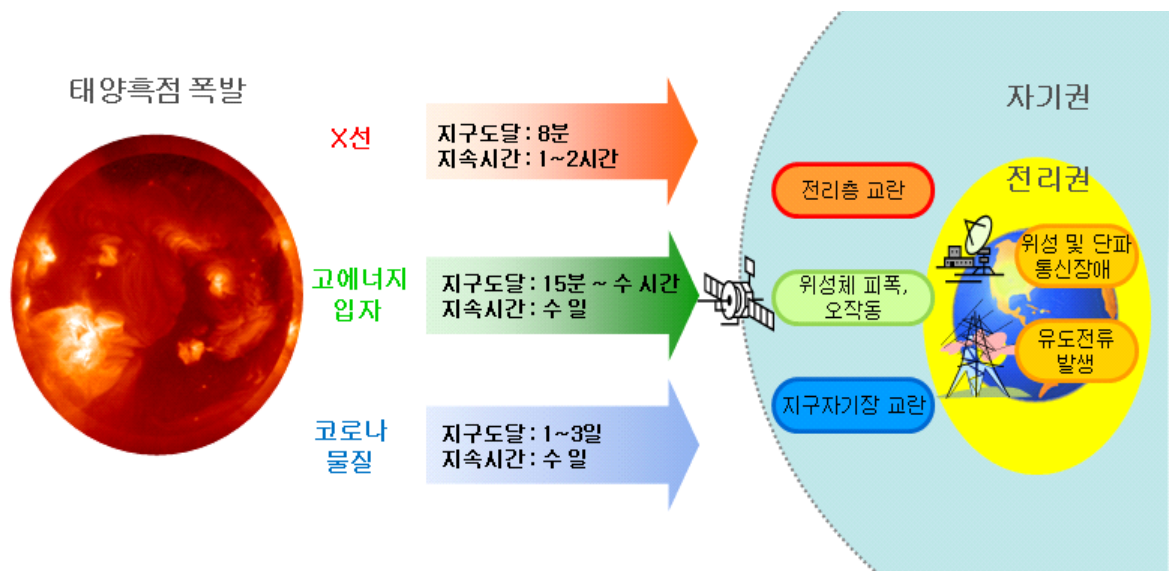


그림1. 태양흑점 폭발 현상 개요

특히, 지구로 도달하는 고에너지 값은 (표1)과 같이 10MeV이상의 양성자 입자수($\text{cm}^2\text{-s-sr}$)를 기준값으로 사용하며, 이에 따라 국내 국립전파연구원을 비롯한 해외 주요기관들은 예경보를 발령하고 있다. 보통 태양고에너지 입자는 전자, 양성자, 중이온 등 다양한 입자의 종류를 통칭하나, 본 연구에서는 양성자 만을 고려하여 연구를 수행하였다.

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

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

특히, 고에너지 태양입자(양성자)는 10 MeV 이상의 매우 높은 에너지를 가진 입자로, 지구로 입사할 경우 위성체에 우주방사선 피폭 피해를 입히거나, 전자 장비의 고장 등의 피해를 유발하는 것으로 알려져 있다.[1]

이에 따라, 우주환경의 피해의 약 70% 이상이 위성체 손상 및 궤도 제어 실패 등 위성분야에 집중되는 등 위성분야에서의 고에너지 모니터링이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

또한, 양성자는 지구 자기력선을 따라 극 지역으로 입사하게 되는데, 이 경우, 극 지방을 지나는 항공기 승객 및 승무원에 우주방사선 피폭 피해를 입히게 하는 등 우주환경이 지상에 미치는 가장 대표적인 피해들을 유발하게 된다.

이에 따라, 우리 연구원에서는 태양입자 피해에 사전에 대비하고 보다 안정적인 서비스 운용 및 제공을 위해서는 태양입자량 예측을 위한 연구를 '15년 자체연구과제를 통해 수행하였다.

따라서, 이 연구에서는 양성자가 위성체 운용에 미치는 주요 피해분야와 기작의 조사·분석을 통해, 실제 위성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 약 30년간의 방대한 위성 장애 데이터를 각각 NOAA 및 위성보험사 등을 통해 수집하였고, 위성 장애 분석용 데이터베이스를 구축, 양성자 변화에 따른 위성 장애와의 상관성을 분석하였다.

또한, 이를 통해 실제 위성 운용환경에 맞는 예경보 기준값을 제시하였다.

제2절 태양입자 개요 및 영향

태양에서 방출되는 양성자(proton)는 대개 태양흑점 폭발(Solar Flare) 및 코로나 물질 방출(CME) 등과 같은 현상과 함께 우주로 방출된다.

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.

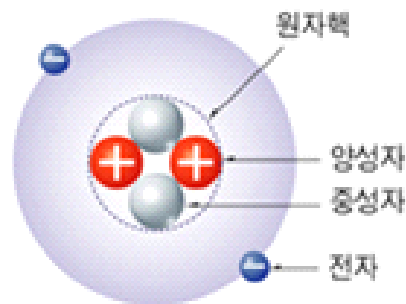


그림2. 원자핵 구조

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].

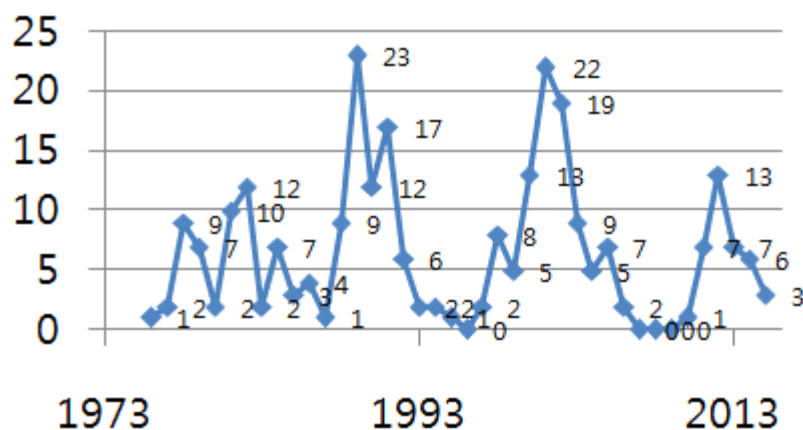


그림3. 과거 태양입자 유입 발생 횟수 (1975~2014)

방출된 고에너지 양성자는 대부분 지구 자기장 및 대기 등의 영향으로 지표면에는 도달하지 못해, 지상 영향은 매우 적다고 알려져 있지만, 자기력의 세기가 약해지는 지구 주변 우주공간 및 고고도 등에서는 양성자에 의한 우주방사선 피해 현상이 지속적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.

표2. 태양입자 유입 단계별 주요 예상 피해

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

이렇게 지구로 입사하는 고에너지 양성자는 물질 투과성이 매우 높아 우주에 존재하는 인공위성 및 생명체에 높은 방사선 피폭 피해를 유발한다.

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 있으며, 각종 반도체 등 전자장비의 논리구조 교란 등의 피해를 입히게 된다.

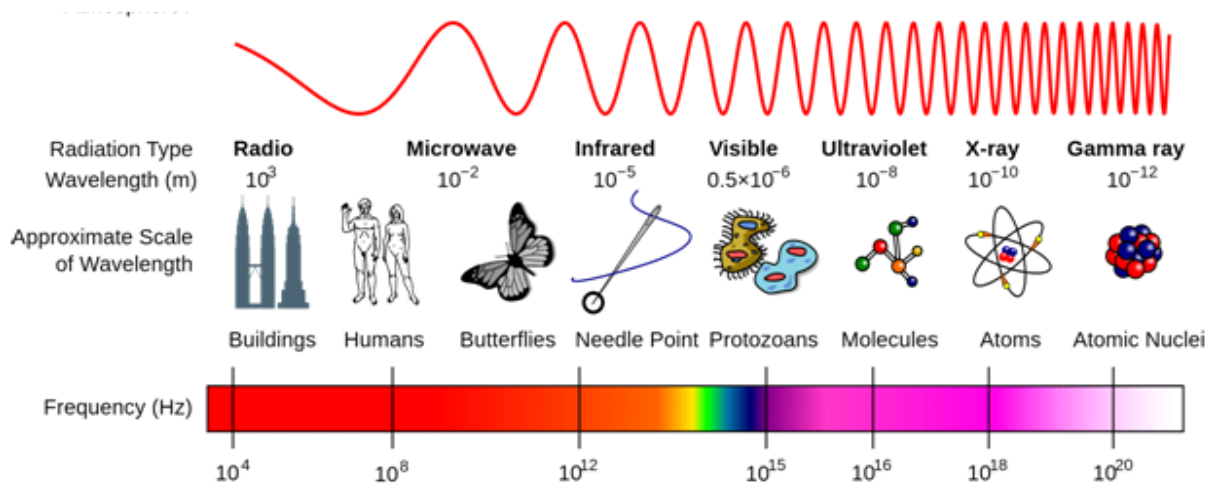


그림4. 우주방사선 특징

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.

제2장 고에너지 양성자의 위성체 피해분석

제1절 데이터 수집

우주전파교란으로 의해 위성 장애 현상이 발생 할 경우 위성장비손상, 위성수명단축, 위성통신장애 또는 위성자세 및 궤도 변화 등 위성 운용의 전반적인 부분에 걸쳐 위성 임무수행을 저해하게 된다. NOAA에서는 위성주변 우주환경변화로 인한 위성 장애 현상을 다음 (표3)과 같이 9개의 항목으로 구분해 놓았고 위성 장애 현상의 원인으로 (표4)와 같이 6개의 항목으로 구분하여 1973년부터 1994년까지 위성 장애 현상 이벤트의 데이터 베이스를 작성해 놓았다.

표3. 위성 장애 현상 분류

약어	용어	설명
PC	phantom Command	명령을 하지 않은 상태에서 이상 현상으로 인한 명령으로 오인
PF	Part Failure	부분적인 고장
TE	Telemetry Error	원격 계측 명령의 이상
SE	Soft Error	회복될 수 있는 bit-flip형 이상
HE	Hard Error	영구적으로 사용할 수 없는 chip 손실 또는 Latch-up
SS	System Shutdown	시스템 정지
ESDM	Electro Static Discharge Measured	정전기 방전
ATT	Attitude Control Problem	자세제어의 문제
UNK	Unknown	미확인

표4. 위성 장애 현상 진단

약어	용어	설명
ECMP	Electron Caused Electromagnetic Pulse	전자기적 펄스에 의한 정전기적 간섭
ESD	Electro Static Discharge	위성 표면의 정전기적 방전
SEU	Single Event Upset	고에너지 입자가 위성의 차폐막을 투과하여 내부 반도체 소자에서 이온화 시켜 이상 현상 유발
MCP	Mission Control Problem	인공적인 혹은 소프트웨어에 의한 문제
PFI	Radio Frequency Interference	RF 간섭
UNK	Unkown	미확인

위성 장애 현상으로 제공하고 있는 데이터는 다음과 같이 위성 장애 발생 시간과 위성 궤도, 위치, 이상 현상 원인과 결과 등을 명시해놓았다. 1973년부터 1994년까지 총 5020개의 이벤트가 있는데 포함되어 있는 궤도 중에는 타원궤도나 태양계탐사위성 등 위성 장애 현상 발생 지역이 불분명하거나 지구 자기권 바깥쪽에 위치한 경우도 포함되어 있다. 따라서 우주환경변화가 발생하였을 때 위성주변의 상태 변화가 비슷한 궤도를 확인해보기 위하여 정지궤도 위성과 극궤도 위성에 대하여 조사를 하였다.

NOAA에서 제공하고 있는 방사선 영향 위성 장애 현상 리스트는 다음과 같은 정보를 포함하고 있다.

- ① 위성 장애 리스트에 등재된 날짜
- ② 위성 식별명
- ③ 위성 장애가 발생한 날짜

- ④ 위성 장애가 시작된 시간 (분 단위)
- ⑥ 위성 장애가 지속된 시간 (분 단위)
- ⑦ 위성 장애가 발생한 지방시
- ⑧ 위성의 궤도별 종류
- ⑨ 위성의 북반구 및 남반구 위치
- ⑩ 위성 장애가 발생되었을 때 위성이 위치한 위도
- ⑪ 경도에 따른 동서 방향 구분
- ⑫ 위성 장애가 발생되었을 때 위성이 위치한 경도
- ⑬ 위성의 고도
- ⑭ 위성 장애 분류
- ⑮ 위성 장애 진단
- ⑯ 위성 장애 관련 주석
- ⑰ 태양-위성-지구간의 각도

위성 보험사에서 제공하고 있는 방사선 영향 위성 장애 현상 데이터는 1985년부터 2009년까지 총 232개 이벤트로 다음과 같은 정보를 제공하고 있다.

- ① 위성 식별명
- ② 위성 모델명
- ③ 위성 발사체
- ④ 위성 장애 발생 시점 (발사단계, 임무단계 등)
- ⑥ 위성 발사 날짜
- ⑦ 위성 장애가 발생한 날짜
- ⑧ 위성 장애 발생으로 지급한 보험금
- ⑨ 위성 장애 관련 주석

위성 보험사 데이터는 위성의 발사 시점 및 궤도 진입과정에서 이상이 생긴 경우가 181건으로 우주환경변화와는 무관한 데이터를 제외하고 51건만을 고려하여 연구를 진행하였다. 비교적 데이터가 많은 NOAA의 분류법을 따라서 위성 장애 현상을 나누고 최종 데이터를 취합하였다.

제2절 수집데이터 정제

NOAA와 위성 보험사 데이터를 수집하여 위성 장애 현상을 분류 및 진단 가능하도록 정제하였다. 위성 장애 현상 및 진단이 불분명한 데이터를 제거하고 우주환경변화와 무관한 이벤트를 배제하여 총 238개의 위성에서 889개의 위성 장애 현상을 고려하여 연구를 진행하였고, (표5)에 위성 장애 진단(원인)을 기준으로 어떤 장애가 발생(결과)하였는지 정리하였다.

표5. 위성 장애 원인 및 결과

장애 진단	장애 분류	이벤트 수	백분율(%)
ElectroStatic Discharge	PC	241	27.1
	ESDM	82	9.2
	TE	38	4.3
	ATT	3	0.3
	PF	1	0.1
	SE	1	0.1
Single Event Upset	SE	425	47.8
	TE	35	3.9
	PC	13	1.5
	HE	2	0.2
	ESDM	1	0.1
Electron Caused ElectroMagnetic Pulse	ESDM	22	2.5
	SE	16	1.8
	PF	2	0.2
SDC	PC	7	0.8
합 계		889	100

제3절 주요 피해 유형

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

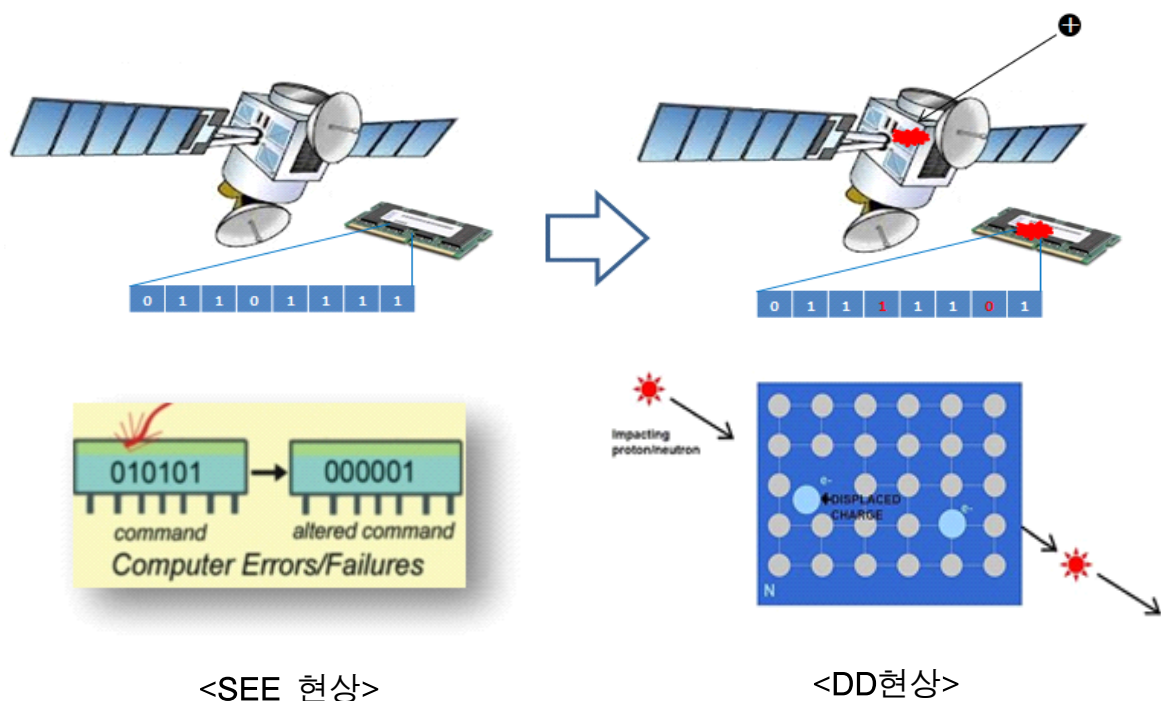


그림 5. 양성자의 위성체 피해 과정

1. 단일장애현상(SEE: Single Event Effect)

SEE는 고에너지 우주 입자가 위성내부에 탑재된 모든 전기적 소자에 영향을 미치는 현상을 말한다. 입사된 고에너지 입자는 자신의 에너지를 잃고 전자-정공쌍을 생성한다. 이때 전달되는 단위 입자 궤적 당에 잃은 에너지량을 Linear Energy Transfer (LET)라고 하며 입사하는 입자의 종류, 전하상태와 물질의 종류에 따라 달라 달라지며 입자의 에너지에도 관계된다. 이러한 현상은 고에너지 입사가 물질에 입사한 경로근방에서 생성이 된다. 전자-정공쌍이 많아 질 경우 공핦층에 걸린 전기장이 외부 영역에까지 영향을 미쳐 위성 주변 전하를 더욱 가속 시키기 때문에 더 많은 전하가 위성체 모이게 된다.

SEE현상은 크게 탑재체의 회복이 가능한 경우와 회복이 불가능한 이상 현상으로 구분되어 질수 있다. 회복이 가능한 이상 현상은 장치 작동에 오류를 발생시키며 시간이 지나면서 자체 복구가 되거나 메모리 기능을 다시 설정함으로써 이상 현상 전 상황으로 복구시킬 수 있다. 이러한 회복 가능한 이상 현상은 다음과 같다.

가. Single event transients(SETs)

고에너지 입자가 장비의 복합회로에 입사하였을 때 발생하며 기기 내부에서 이상 전위와 전류 스파이크를 유도할 수 있는 현상이다. 전류 스파이크가 충분히 클 경우 서킷 보드를 관통 할 수 있다.

나. Single event upsets(SEUs)

내부로 침투한 고에너지 입자가 메모리담당 부분에 상태변화를 일으키는 현상을 말한다. 메모리 담당부분은 SRAM, flash, flop과 latch등이 있다. SEUs 경우 메모리의 기기 이상을 일으키는 비트 수에 따라 Single-bit upset(SBU)와 Multi-bit upsets(MBUs)로 구분이 되어 진다. SEU는 SEE 현상에서 항공전자운영에 관련하여 가장 일반적으로 많이 발생하는 현상이다.

다. Single event function interrupts(SEFIs)

SEFIs는 사용자 데이터의 단순한 손상을 제외한 다른 일반적인 장치의 이상 현상을 말한다. 이 현상은 회로의 기능을 변화시키기 때문에 전원이나 또는 기기 재설정을 통하여 이전 상태로 복구를 할 수 있다.

반면 장치에 지속적이거나 영구적인 손상을 일으켜 회복을 불가능하게 하는 이상 현상은 다음과 같이 분류가 된다.

라. Single event latch-up(SEL)

방사선의 유입으로 위성 내부 집적회로에서 내부 접합부 일부가 도통되어 집적회로에 순간적으로 과전류가 흐르게 되고 이로인해 회로가 일부 또는 전체가 파괴되는 현상이다.

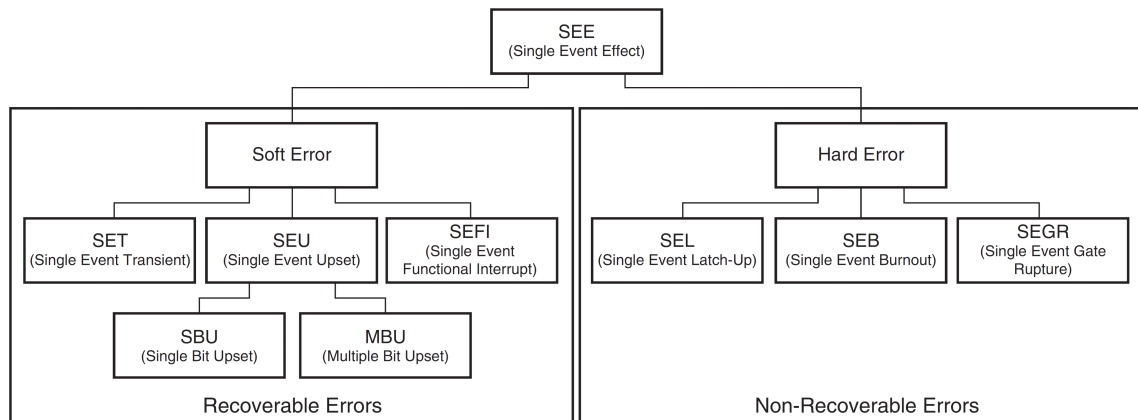
마. Single event burnout(SEB)

고에너지 이온이 트랜지스터 소스에 영향을 주어 순방향 바이어싱을 일으키는 단락현상이다. SEB는 일반적으로 전력 MOSFET에 대하여 이상 현상으로 나타내지만 IGBT, 고전압 다이오드 등 이와 유사한 회로에서도 발생 된다.

바. Single event gate rupture(SEGR)

고에너지 이온의 유입되어 위성 내부기기에 충돌하여 생기는 플라즈마 스파이크로 게이트 산화막 절연체가 파열되는 현상을 말한다.

위성 업계에서는 장비 on-off, 위성체에 오류 자동 탐지 및 제어 (On-board correction) 기능 탑재 등의 대응 기술을 통해, 위성 피해에 대비하고 있다. (그림 #)은 SEE의 종류와 분류를 정리하여 나타내었다.



WP402_01_082311

Figure 1: Types of Single Event Effects

그림 6. Single Event Effect의 이상 현상 종류와 그에 따른 분류

2. 변위손상현상(DD:Displacement Damage)

DD는 위성에 입사한 입자가 이온화되지 않은 상태로 매질내부에서 자신의 운동에너지를 잃으면서 발생하는 현상이다. 입자가 지나간 궤적에서 발생하는 손상의 주요한 유형은 재질의 격자 결함(vacancy)과 격자 침입(interstitial)이 있다. 격자 결함은 매질의 정상적인 격자위치에 원자가 비는 경우를 말하고 격자침입은 매질의 격자위치가 아닌 비격자 위치에 원자가 존재하는 것을 말한다. DD를 통하여 발생한 결함은 결함위치가 서로 떨어진 경우 일정한 지점에서 점이나 고립된 형태로 발생되거나 밀집한 경우 결함 군집과 같이 국소적인 영역에서 발생할 수 있다. 이러한 피해에도 위성 기본성능 유지를 위해 위성설계 단계부터 여유마진 설계(power margin), 오류 자동 탐지 및 제어 기법 등을 적용하고 있다.

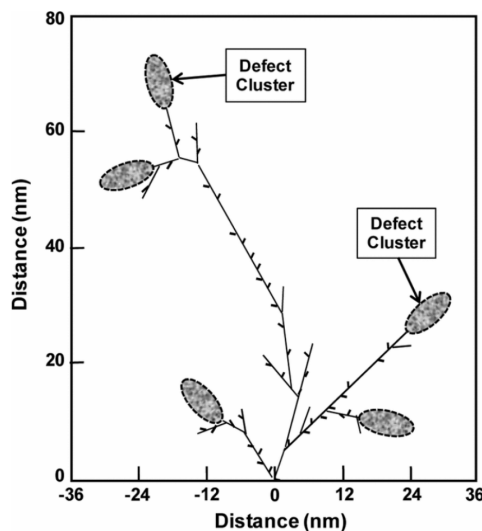


그림 7. 실리콘 재질 내부에서 발생된 DD로 인한 결함

특히, 방출된 태양입자의 지구 도달 시 지구자기장 영향 등 지구 유입-반사의 일련의 과정에 따라 (표6)과 같이 위성 궤도에 따른 영향이 다소 상이하게 나타나게 되는데, 피해사례 관점에서는 위성분야 단일 장애현상이 변위손상현상보다 자주 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 고에너지 양성자에 의한 위성 장애사례도 태양극대기로 갈수록 빈번하게 발생하는 경향이 있다고 알려져 있다.

표6. 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

제3장 고에너지 양성자의 위성 영향 분석

제1절 입자 데이터 특성

위성 장애 현상과 고에너지 양성자와의 상관성을 분석하기 위해, 수집된 위성장애 기간인 1973년~1994년 사이에 정지궤도(GOES 위성)에서 관측한 태양 양성자, 전자 데이터를 사용하였다. GOES 위성은 각각 10MeV, 50MeV, 100MeV 이상의 대역에서 양성자를 관측하고, 0.8MeV, 2MeV 이상의 대역에서 전자를 관측한다. 이 연구에서는 (표7)과 같이 태양입자 유입 예·경보로 사용되는 에너지 등급인 10MeV 이상 대역에서 양성자를 0.8MeV 이상 대역에서 전자를 이용하여 상관성을 분석하였다. 관측 데이터는 GOES 위성 센터 열화(saturation) 및 위성 SEU 등의 원인에 따라 데이터에 오류(데이터값 : 9999.99)가 나타나며, 이러한 값들은 상관성 분석을 위해 제거하였다.

표7. 태양입자 관측 데이터 특성

특성	내용
수집 기간	9년(1986~1994)
수집 데이터	양성자(10MeV 이상), 전자(0.8MeV 이상)
수집 주기	5분 평균
관측 단위	Particle Flux Units (pfu) 1 pfu = 1 p cm ⁻² sr ⁻¹ s ⁻¹

이 연구에 사용된 태양입자 유입 관측 데이터는 (표8)과 같다. 우주환경변화가 발생하였을 때 위성주변의 상태 변화를 고려해야 하므로, 대부분의 평상시 값은 제외하고 1단계(10pfu) 이상 총 76건의 양성자 값을 이용하였다.

표8. 태양입자 유입 관측 데이터

년도	시작일시	최대값 관측시간	관측 최대값(pfu)
1986	Feb 06/0925	Feb 07/1730	130
	Feb 14/1155	Feb 15/0400	130
	Mar 06/1835	Mar 06/1930	21
	May 04/1255	May 04/1320	16
1987	Nov 08/0200	Nov 08/0940	120
1988	Jan 02/2325	Jan 03/0835	92
	Mar 25/2225	Mar 25/2330	58
	Jun 30/1055	Jun 30/1140	21
	Aug 26/0000	Aug 26/0045	42
	Oct 12/0920	Oct 12/0930	12
	Nov 08/2225	Nov 09/0635	13
	Nov 14/0130	Nov 14/0235	13
	Dec 17/0610	Dec 17/0855	18
	Dec 17/2000	Dec 18/0150	29
1989	Jan 04/2305	Jan 05/0130	28
	Mar 08/1735	Mar 13/0645	3,500
	Mar 17/1855	Mar 18/0920	2,000
	Mar 23/2040	Mar 24/0110	53
	Apr 11/1435	Apr 12/0125	450
	May 05/0905	May 05/1000	27
	May 06/0235	May 06/1045	110
	May 23/1135	May 23/1350	68

년도	시작일시	최대값 관측시간	관측 최대값(pfu)
	May 24/0730	May 24/0905	15
	Jun 18/1650	Jun 18/1910	18
	Jun 30/0655	Jun 30/0710	17
	Jul 01/0655	Jul 01/0720	17
	Jul 25/0900	Jul 25/1225	54
	Aug 12/1600	Aug 13/0710	9,200
	Sep 04/0120	Sep 04/0510	44
	Sep 12/1935	Sep 13/0825	57
	Sep 29/1205	Sep 30/0210	4,500
	Oct 06/0050	Oct 06/0825	22
	Oct 19/1305	Oct 20/1600	40,000
	Nov 09/0240	Nov 09/0610	43
	Nov 15/0735	Nov 15/0910	71
	Nov 27/2000	Nov 28/1105	380
	Nov 30/1345	Dec 01/1340	7,300
1990	Mar 19/0705	Mar 19/2315	950
	Mar 29/0915	Mar 29/1005	16
	Apr 07/2240	Apr 08/1330	18
	Apr 11/2120	Apr 11/2130	13
	Apr 17/0500	Apr 17/0655	12
	Apr 28/1005	Apr 28/1735	150
	May 21/2355	May 22/0750	410
	May 24/2125	May 25/0115	180

년도	시작일시	최대값 관측시간	관측 최대값(pfu)
	May 28/0715	May 29/0100	45
	Jun 12/1140	Jun 12/1700	79
	Jul 26/1720	Jul 26/2315	21
	Aug 01/0000	Aug 01/2015	230
1991	Jan 31/1130	Jan 31/1620	240
	Feb 25/1210	Feb 25/1305	13
	Mar 23/0820	Mar 24/0350	43,000
	Mar 29/2120	Mar 30/0330	20
	Apr 03/0815	Apr 04/1000	52
	May 13/0300	May 13/0910	350
	May 31/1225	Jun 01/0445	22
	Jun 04/0820	Jun 11/1420	3,000
	Jun 14/2340	Jun 15/1950	1,400
	Jun 30/0755	Jul 02/1010	110
	Jul 07/0455	Jul 08/1645	2,300
	Jul 11/0240	Jul 11/0450	30
	Jul 11/2255	Jul 12/0205	14
	Aug 26/1740	Aug 27/1830	240
	Oct 01/1740	Oct 01/1810	12
	Oct 28/1300	Oct 28/1440	40
	Oct 30/0745	Oct 30/0810	94
1992	Feb 07/0645	Feb 07/1115	78
	Mar 16/0840	Mar 16/0840	10

년도	시작일시	최대값 관측시간	관측 최대값(pfu)
	May 09/1005	May 09/2100	4,600
	Jun 25/2045	Jun 26/0610	390
	Aug 06/1145	Aug 06/1210	14
	Oct 30/1920	Oct 31/0710	2,700
1993	Mar 04/1505	Mar 04/1735	17
	Mar 12/2010	Mar 13/0155	44
1994	Feb 20/0300	Feb 21/0900	10,000
	Oct 20/0030	Oct 20/0340	35

제2절 궤도별 위성 장애 분석

비 정지궤도 위성은 플라즈마권 내의 전리층에 놓인 궤도로서 이 경우 총 380개의 위성에서 장애가 발생하였다. 장애 현상은 대부분이 미확인 이지만 원격계측이상이나 기기의 간단한 비트 전이 등의 경미한 장애 현상이 발생하였다. 극궤도 위성은 남대서양자기이상 지역을 지나가기 때문에 위성이상 현상 원인으로는 SEU가 가장 많았으며 실제위성의 이벤트가 발생한 지역을 확인하였을 경우 (그림8)과 같이 남아메리카 지역상공에 가장 많이 분포하였다.

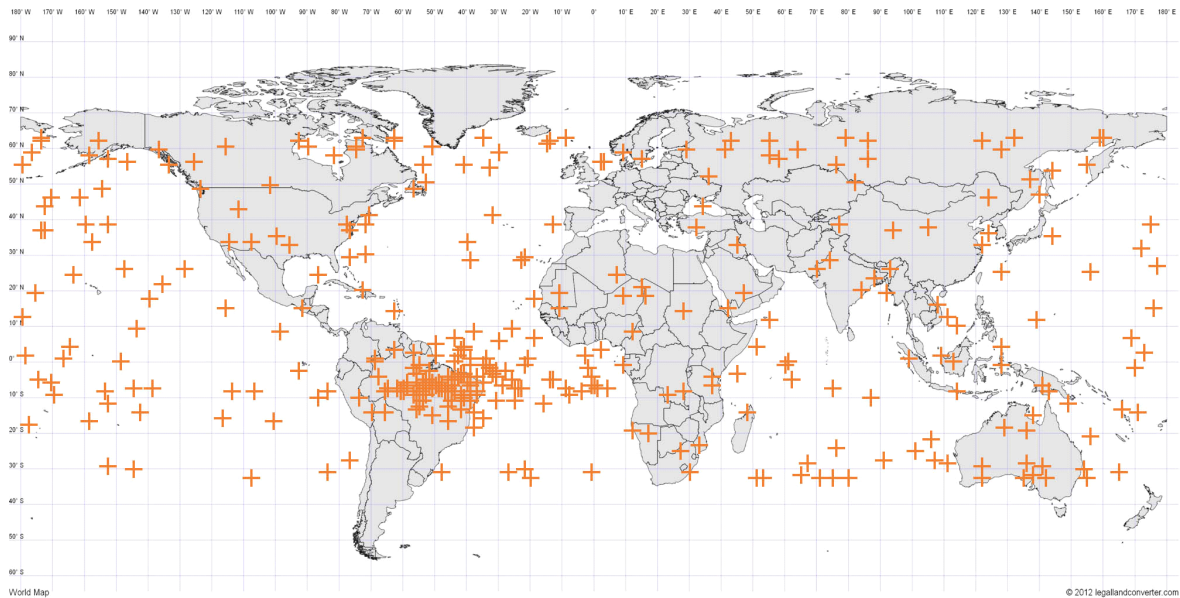


그림 8. 위성 장애 분포 지도

비 정지궤도에서 관측된 위성 장애가 발생한 지역이다. 대부분 남아메리카 상공에 위치해있으며 그 이외의 지역에 표시된 부분은 GCR에 의한 영향으로 추정된다. 정지궤도위성은 상공 35784km의 적도면 근처에서 임무수행을 하게 된다. 이 궤도는 자기권의 외부방사선대를 통과하며 지자기 활동이 없는 조용한날은 플라즈마권을 통과하기도 한다. 그러기 때문에 위성 주변의 입자상태가 극궤도 위성과는 차이가 나기 때문에 위성 장애 현상 또한 상이하게 나타나게 된다. 위성 장애의 종류로 기기의 명령오인이 가장 많았으며 원격계측이상이나 복구가 가능한 경미한 현상이 극궤도 위성과 마찬가지로 대부분을 차지한다. 하지만 발생비율은 적지만 위성 시스템 정지나 복구가 불가능한 하드웨어적 손실 또한 포함되어 있다. 정지궤도에서의 위성이상현상의 원인은 정전기 방전현상이 41%로 가장 많았다.

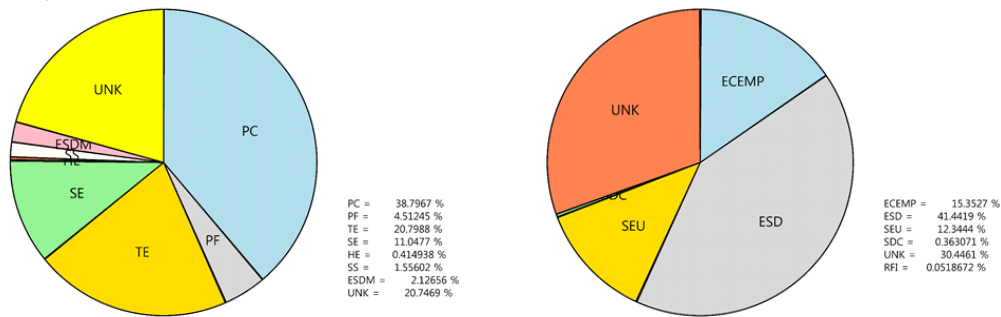


그림 9. 위성 장애 분류(왼쪽)와 위성 장애 진단(오른쪽)

이전 연구에서 정지궤도에서 일어난 위성 이상현상은 지자기 교란시기에 서브스톰으로 인하여 유입된 전자들이 지구의 저녁지역부터 새벽지역까지 돌게 되는데 이 구간에서 많이 발생한다고 보고되었다. 이전연구에서는 위성 한 대에서 관측한 이상현상이나 특정 이상현상만을 다루어 조사를 진행하였다. 이번 조사에서는 1973년부터 1994년까지 정지궤도 위성에서 발생한 1928개의 모든 이벤트에 대하여 위성 이상현상이 발생한 지방시를 확인해보았다. 아래 그림이 정지궤도에서 발생한 위성 이상현상의 지방시 분포이다. 2000 LT - 0600 LT 지역에서 위성 이상현상이 다른 지역에 비해 많이 발생하였고 이러한 내용은 이전 연구들과도 충분히 부합하는 내용이다.

제3절 고에너지 양성자 이벤트 발생일 기준 위성 장애 상관성 분석

정지궤도 위성에서 발생한 장애 현상과 고에너지 양성자 이벤트 사이의 상관성을 분석하기 위해, 이벤트 발생일을 기준으로 관계정도를 조사하였다.

(그림10)은 y축이 시간을 나타내며 0에서 +1 사이에 위성 장애가 발생하였고 -2와 -1 사이에서 우주환경 변화가 감지된 것을 나타내고 있다. 고에너지 양성자 값이 변화하는 것을 빨간색으로 표시 하였으며 이와 비슷한 양상을 보이는 알파입자 변화를 검정색으로, 전자량은 파랑색, X선은 노란색으로 표시하였다. 그래프에서 보이는 것과 같이 고에너지 양성자 값이 증가하고 2일이 지난 후 위성 장애가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

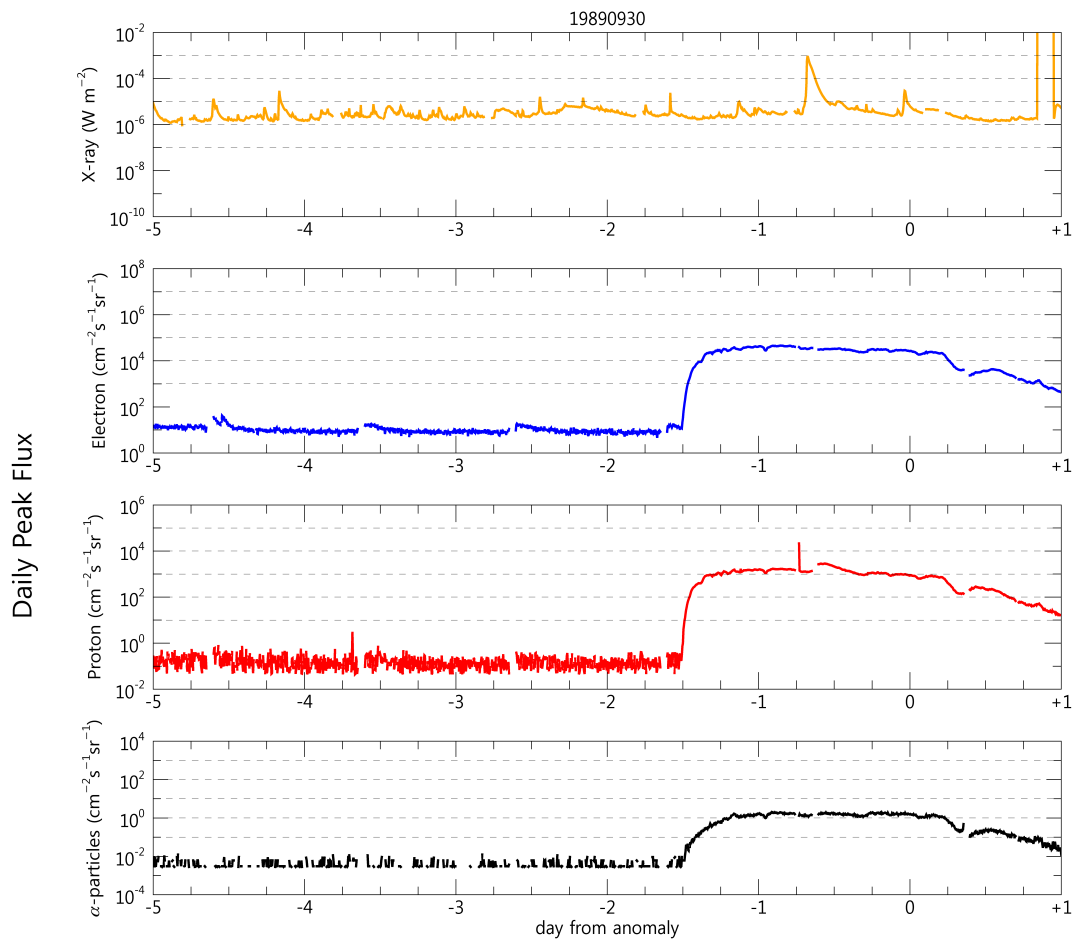


그림 10. 우주환경변화 후 위성 장애 발생

이와 같은 방법으로 76개의 고에너지 양성자 이벤트와 889개의 위성 장애 현상을 발생일 기준으로 비교 한 결과 5일 전을 기준 131건, 3일 전은 45건, 1일 전은 19건이 조사되었다.

발생일 기준으로 위성 장애에 더 높은 관계가 있는 입자를 분석하여 (표9)로 정리하였다. 모든 기준일 전, 단일 입자의 경우는 전자량의 변화가 양성자량의 변화보다 높거나 같을 때 위성 장애가 발생하였고, 복수 입자를 고려한다면 태양활동이 활발하여 전자와 양성자가 모두 증가하여 변화할 때 위성 장애 발생 비율은 2배에서 7배 이상 증가하는 경향을 보였다. 특히, 1일 전 발생하는 전자와 양성자의 변화로 인해 약 80% 의 비율로 위성장애가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

표9. 태양입자 유입 관측 데이터

	입자	백분율 (%)	이벤트 수
5일 전	전자	16.8	22
	양성자	16.0	21
	전자+양성자	41.2	54
	관계없음	26.0	34
3일 전	전자	24.4	11
	양성자	8.9	4
	전자+양성자	55.6	25
	관계없음	11.1	5
1일 전	전자	10.5	2
	양성자	10.5	2
	전자+양성자	78.9	15
	관계없음	0.0	0

제4절 피해 유형별 위성 장애 현상

발생일 기준으로 관련이 있는 131개의 이벤트의 피해 유형을 조사한 결과 위성 표면의 정전기적 방전인 ESD가 가장 많았고, 내부로 침투한 고에너지 입자가 메모리담당 부분에 상태변화를 일으키는 현상인 SEU가 두 번째로 많았다. 전자기적 펄스에 의한 간섭현상이 가장 적었으며, 장애 현상은 명령을 하지 않은 상태에서 이상 현상을 일으키는 Phantom Command가 가장 많이 나타났다.

표10. 위성 장애 진단

	1일 전	3일 전	5일 전
ECEMP	1	6	11
ESD	12	28	71
SEU	6	11	49
합계	19	45	131

제4장 결론

이 연구는 태양흑점 폭발 등으로 인한 고에너지 양성자 방출에 따라, 발생하는 인공위성의 장애 현상에 대해 분석하였다. 이를 위해, 지난 30여년간의 방대한 위성 장애 데이터를 수집, 데이터 베이스화 하였으며, 장애 발생 특정일을 기준으로, 위성 장애와 관계성을 분석하였다.

고에너지 입자로 인한 위성 장애현상은 일반적으로 알려진 바와는 다르게, 변위손상으로 인한 피해가 단일장애현상 보다는 다소 빈번히 발생한 것으로 분석되었다.

또한 장애 기준일로만 보면, 단일 입자 효과는 단일 입자의 경우는 전자량의 변화가 양성자량의 변화보다 높거나 같을 때 위성 장애가 발생하였고, 복수 입자를 고려한다면 태양활동이 활발하여 전자와 양성자가 모두 증가하여 변화할 때 위성 장애 발생 비율은 2배에서 7배 이상 증가하는 경향을 보였다. 특히, 1일 전 발생하는 전자와 양성자의 변화로 인해 약 80%의 비율로 위성장애가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 위성 장애 발생 데이터는 우주전파센터에서 제공하는 각종 예보 등의 기준값으로 활용되거나, 위성 실 수요자의 위성 운용 환경에 보다 정밀한 데이터를 제공해 줄수 있을것으로 사료된다.

[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.19, 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.

고에너지 양성자에 대한 인공위성 영향 연구



국립전파연구원

National Radio Research Agency

(58217) 전남 나주시 빛가람로 767

발 행 일 : 2016. 12.

발 행 인 : 유 대 선

발 행 처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4414

인 쇄 : (사)한국척수장애인협회 광주·전남인쇄사업소
062) 222-2788

ISBN : 979-11-5820-073-2 < 비 매 품 >

주 의

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