

## 근 지구 우주환경이 위성에 미치는 영향

이창호\*, 한동인\*\*

### Terrestrial Space Environment Effect on Satellite

Chang-Ho Lee\*, Dong-In Han\*\*

#### Abstract

Space environment has various hazard effects on satellite. These effects can not be experienced in earth ambient condition. In terrestrial space, plasma or atomic oxygen could erode satellite surface. Also ultra violet or particle radiation may damage surface materials or electronic parts which constitute satellite. So, in designing satellite, the natural environment of operational orbit should be investigated and appropriate mitigation should be prepared.

#### 초 록

우주 환경은 두꺼운 대기층에 의해 보호되는 지표 환경에서는 경험할 수 없는 여러 가지 위험 요소가 있다. 근 지구 궤도에서는 플라스마 대기 및 원자 산소 등에 의해 부식이 발생할 수 있으며, 강한 자외선과 입자 복사 등에 의해 위성을 구성하고 있는 재료나 전자 부품 등이 손상을 입을 수 있다. 따라서 위성의 설계 시에는 운용궤도에서 예상되는 환경요인을 적절히 예측하여 이에 대응하는 설계가 이루어지도록 해야 한다.

키워드 : 우주 환경(space environment), 원자 산소(atomic oxygen), 플라스마(plasma), 자외선 복사(ultra violet radiation), 입자 복사(particle radiation), 지구 자기장(earth magnetosphere), 저궤도 위성(LEO satellite)

#### 1. 서 론

우주 환경에는 두꺼운 대기층 및 지구 자기장에 의해 보호되는 지표에는 존재하지 않는 여러 가지 위험 요소가 존재한다. 이들은 위성의 성능을 약화시키거나 경우에 따라서는 치명적인 기능 상실을 야기할 수 있다. 실제로 '그림 1'에서 볼 수 있는 바와 같이 위성의 고장 중 약 36 ~ 57% 가량이 설계 또는 환경요인으로 인해 발생한 것으로 추정된다.

또한 상업용 소형 위성 경우 부피 및 무게가 한정되어 있고 고 집적 부품을 사용함에 따라 외부 환경의 위험 요인을 효율적으로 차단하는 것이 더 중요하게 되었다.

저궤도 위성이 처할 수 있는 근 지구 우주환경 영향으로는 크게, 대기에 의한 영향, 전자기 복사에 의한 영향, 입자 복사에 의한 영향, 그리고 플라스마에 의한 영향 등으로 구분될 수 있다. 다음 절에서는 이들에 대하여 개략적으로 설명하고자 한다.

\* 위성본체그룹/chlee@kari.re.kr

\*\* 위성본체그룹/dihan@kari.re.kr

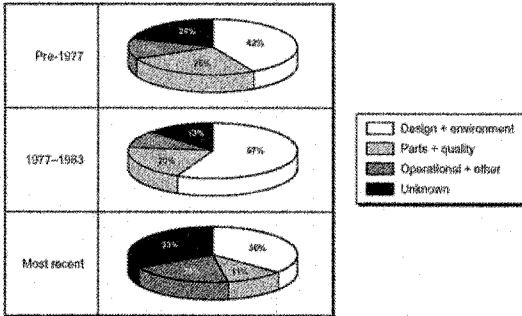


그림 1. 위성의 고장 경향 [6]

## 2. 대기에 의한 영향

지구의 대기는 크게 일반적인 대기를 의미하는 중성 대기(Neutral Atmosphere)와 플라스마(Plasma) 대기로 나뉜다. 즉, 지표면에 가까운 층은 전기적으로 중성인 대기로 이루어져 있으며, 그 위에 전하를 가진 기체인 플라스마 대기층이 존재한다. 중성 대기는 중력에 의하여 지구의 둘레에 구상으로 분포해 있는데 반해 플라스마 대기는 자기장의 형태에 따라 그 분포가 달라진다.

위성이 운용되는 고도에서의 대기 밀도는 지상에 비해 극히 낮으나 이들이 위성의 운용에 미치는 영향은 크다. 비록 대기 밀도는 낮으나 위성의 속도가 상대적으로 빠르므로 적지 않은 양의 토크(Torque) 및 항력(Drag)을 야기할 수 있다. 또한 고층 대기 중에 포함된 원자 산소(Atomic Oxygen)는 위성 외부 표면을 부식시키거나, 재료의 화학적 특성을 변경시키기도 한다.

### 2.1 대기의 조성

지구 대기는 그 조성에 따라 균질권(Homosphere)과 비균질권(Heterosphere)으로 구분할 수 있다. 균질권은 지상에서 약 50km 이하의 영역에 위치하며, 이 영역에서의 대기는 난류 등에 의해 충분히 섞여있어서 그 조성이 고도의 변화에 따라 변하지 않는다. 반면에 비균질권(Heterosphere)은 균질권의 상부에서부터 시작하여 약 500km 부근

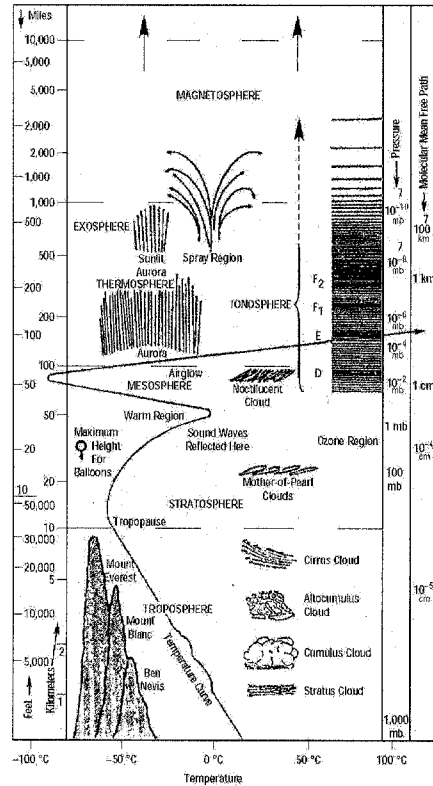


그림 2. 고도에 따른 대기의 수직 분포[4]

까지의 영역에 위치하는데, 기체의 분자량에 따라 그 분포비가 높이에 따라 달라진다. 따라서 질소 및 산소 등의 무거운 기체는 수소 및 헬륨 등의 가벼운 기체에 비해 고도가 높아짐에 따라 조성비가 급격히 감소하게 된다. 고도에 따른 대기의 수직분포 및 조성비는 '그림 2' 및 '그림 3'과 같다.

### 2.2 대기의 변화

고 고도에서의 대기의 밀도는 시간, 위도, 고도, 태양의 활동, 그리고 지자기(Geomagnetic) 활동 등에 의해 바뀐다.

대기로 흡수된 전체 태양 에너지 중에서 약 3분의 1 가량은 대기를 가열하는데 사용되고, 절반은 자외선 대기광(Airglow)에 의해 다시 우주

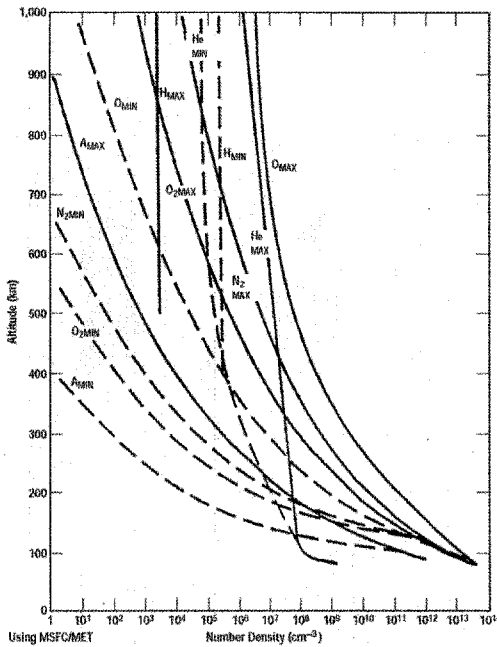


그림 3. 고도에 따른 대기의 조성 [5]

로 복사되며, 그 나머지는 원자 산소의 화학 반응에 사용된다.

대기광은 태양 복사 자외선의 전리작용과 해리작용에 의해 주간에 만들어진 원자나 이온이, 화학반응에 의해 야간에 서서히 소멸할 때 발생하는 빛으로 태양 활동 및 전리층의 상태에 영향을 받는다.

극자외선 및 자외선 등과 같은 단 파장의 태양 복사는 태양의 활동에 직접 연관되며, 이들은 열권의 온도를 변화시켜 밀도를 바꿀 수 있다. 결국, 위성의 궤도가 위치한 열권의 밀도는 태양의 활동에 큰 영향을 받는다. 또한 대기의 밀도 변화는 지자기의 활동과도 관련되어 있다. 지자기 폭풍이 발생한 경우, 많은 양의 대전 입자들이 자기권(Magnetosphere)으로부터 고위도의 대기로 끌려들어오게 된다. 이러한 입자들은 대기 분자와 충돌하여 고위도 대기를 이온화 시키거나 가열하여 대기의 밀도를 변화 시킨다. 이러한 현상은 약 300km에서 1000km 고도의 대기 영역에

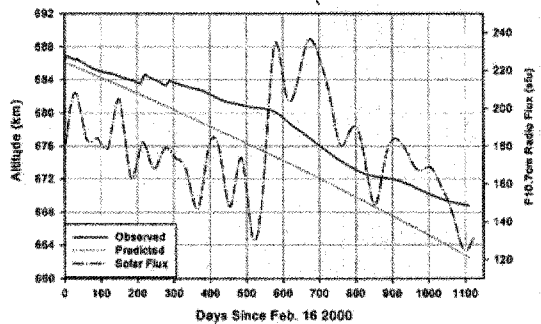


그림 4. 아리랑위성 1호기의 운용 중 고도 변화 [7]

서 발생하며, 지자기의 요동이 처음 관측된 후 수 시간 후에 발생하기 시작하여, 지자기의 요동이 끝난 후에도 약 8~12 시간 가량 지속된다.

### 2.3 위성에 대한 대기의 영향

대기의 특성 중 위성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 밀도이다. 위성이 운용되는 고도에서의 대기 밀도는 지상과 비교하여 거의 진공 상태에 가깝지만, 궤도를 선회하는 위성의 고도 및 움직임 바꾸기에는 충분한 양이다. '그림 4'는 태양 활동과 아리랑위성 1호기의 평균 고도 변화를 나타내고 있다. 이에서 볼 수 있듯이 위성의 고도는 대기의 항력에 의하여 지속적으로 감소하고 있다. 따라서 위성의 추진 시스템 및 자세제어 시스템은 대기에 의한 항력 및 토크를 보정할 수 있도록 고려되어야 한다.

약 200 km에서 400 km 고도의 대기 중에 존재하는 산소는 자외선 등에 의해 원자 산소의 형태로 광분해(Photodissociation) 된다. 따라서 저궤도 고도의 대기 중에는 원자 산소가 비교적 풍부하게 존재하는데, 이들은 위성에 사용된 재료의 화학적 특성을 바꾸거나 재료를 부식시킬 수 있다. 특히 폴리머 계열의 접착테이프나, 필름, 도료나 코팅, 그리고 윤활제 등이 사용되는 경우 원자 산소에 의한 특성 변화에 유의하여야 한다. 필름 등의 표면에 인듐-주석 산화물(ITO) 코팅을

수행하여 원자 산소에 내성을 갖게 할 수도 있다.

원자 산소에 의한 작용은 자외선 복사, 이온 조사(Sputtering), 그리고 오염(Contamination) 등에 의해 촉진되어 더욱 큰 피해를 주기도 한다. 예로서 FEP 필름의 경우에는 원자 산소 및 자외선 복사가 복합적으로 존재하는 환경에서 취약해지는 경향이 있다. 원자 산소에 의한 효과는 위성의 속도 벡터와 수직인 면에서 가장 심하게 발생하므로 램 표면(Ram Surface)에 사용되는 재료의 선정에는 유의가 필요하다.

중성 대기에 의한 또 다른 효과로 글로우(Glow) 현상이 있다. 이는 대기 중의 준안정(Metastable) 분자가 위성 표면과의 충돌에 의해 들뜨게 되어 발광하는 현상으로, 위성의 표면은 일종의 촉매와 같은 역할을 하며, 표면 재료의 종류에 따라 글로우 현상의 강도가 달라진다. 저궤도 위성의 경우 글로우 현상으로 인해 광학 센서 등이 제 기능을 수행하지 못할 수도 있다.

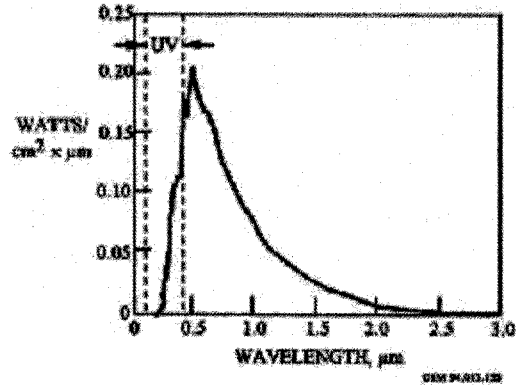


그림 5. 태양 전자기 복사 스펙트럼 [2]

### 3. 전자기 복사에 의한 영향

#### 3.1. 태양 전자기 복사

저궤도로 복사되는 태양 자외선의 파장은 대략 0.1μm에서 0.4μm 정도이며, 그 에너지는 태양 상수의 약 8%에 해당한다. '그림 5'는 태양 전자기 복사(Electromagnetic Radiation)의 각 파장대별 에너지 분포를 나타낸다. 태양 상수는 파장 1000μm까지의 대역에서 태양에서 복사되는 에너지를 의미하며, 약 136.7 mW/cm<sup>2</sup>의 값을 갖는다.

#### 3.2. 위성에 대한 전자기 복사의 영향

태양 전자기 복사 중 위성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 자외선 복사이다. 이러한 자외선 복사는 '그림 6'에서 볼 수 있는 것과 같은 다양한 형태의 유기 결합(Organic Bond)을 손상시킬 수 있다. 파장 0.2 μm 이하의 태양 복사 에너지

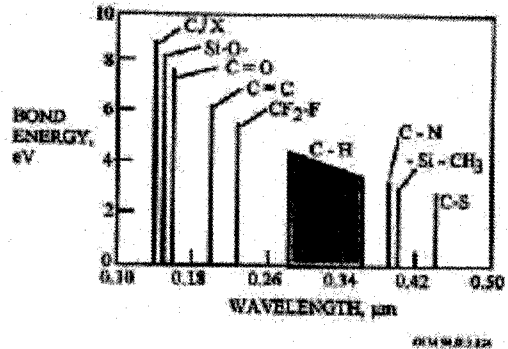


그림 6. 폴리머 재료의 결합을 파괴할 수 있는 파장 요건 [2]

는 전체 태양 상수의 0.001%에 불과하나, 이들은 미량만으로도 C-C 또는 C-O 등과 같은 유기 결합을 파괴할 수 있으며, 폴리머 재료에 교차 결합(Crosslink)이 생성되도록 하기도 한다. 이러한 현상들로 인해 자외선 복사에 노출된 폴리머 재료는 취약(Embrittlement)해지거나 표면 균열(Surface Cracking)이 발생하여 기계적 손상을 받기 쉽게 된다. 이는 접착테이프 또는 필름과 같이 기계적인 유연성이 요구되는 부분에 사용되는 폴리머재료에 있어서는 중요한 문제이다. 일반적으로 FEP 또는 Polyimide 필름은 자외선 복사에 비교적 강한 것으로 알려져 있다.

원자 산소가 비교적 풍부하게 존재하는 저궤도의 경우, 광자 흡수(Photon Absorption) 반응에 의한 중간 생성물이 산화 반응(Oxidation)의 중간 생성물과 반응할 수 있는데, 이러한 광산화(Photo-oxidation) 반응에 의해 폴리머 재료의 색이 변화되거나 투명도가 감소될 수 있다. 폴리머 계통의 도료(Paints), 코팅 또는 이차면경(Second Surface Mirror)을 사용하는 경우 이러한 현상은 열 제어 특성의 저하로 나타나게 된다. 또한 이외에도 유기질 유리(Organic Glass)가 사용되는 광학 부품 및 센서 등의 성능 또한 저하될 수 있다. 이와 같이 태양 복사는 광학 재료의 흡수율 대 복사율의 비, 투과율, 그리고 반사율 등을 변화시키므로 재료의 선정에 유의가 필요하다.

이 외에도 자외선 복사에 의해 분자의 화학적 특성이 바뀔 경우 해당 재료가 극성(Polar Group)을 띠는 경우가 있을 수 있다. 이 경우에는 재료의 전기적인 특성이 변하게 되므로 유의하여야 한다.

#### 4. 투과성 대전 입자 복사의 영향

투과성 대전 입자(Penetrating Charged Particle)에 의한 복사는 위성의 설계와 운용에 있어서 가장 큰 위협 요소 중의 하나이다. 이들 대부분은 외성 외벽을 구성하고 있는 금속성의 차폐 벽을 관통하기에 충분한 에너지를 갖고 있다. 따라서 위성 내부에 탑재된 장비들에게 직접 영향을 줄 수 있다. 이들 대전 입자는 자신이 관통하여 지나간 궤적(Wake) 부근의 원자를 이온화시키거나 원자의 위치를 변경시키기도 하는데, 이로 인하여 위성 내부에 상당한 수준의 이온화가 야기되기도 하고, 디지털 집적회로의 경우에는 비트 플립(Bit Flip)을 발생시키고, 폴리머 재료 등의 특성을 변화시키기도 한다.

지구 부근 영역에서의 복사는 크게 갇힌 입자(Trapped Particle)에 의한 복사와 우주 복사(Cosmic Radiation)로 분류될 수 있는데, 이들 두 가지의 종류의 복사는 모두 태양의 활동 및 지자기에 의해 영향을 받는다. 갇힌 입자에 의한 복

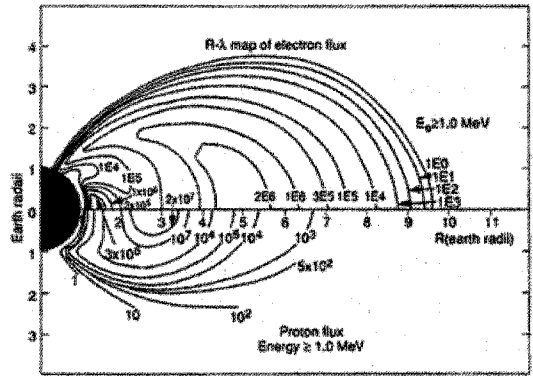


그림 7. 밴앨런대의 갇힌 입자 분포[9]

사는 밴앨런대(Van Allen Belts) 내에서 발생하는데, 플라스마(Plasma) 입자가 자기권 내에서 가속되어 발생한다. 반면에 우주 복사는 행성간 우주(Interplanetary Space)에서 발생하여 가속된 입자인 우주선(Cosmic Ray) 또는 태양 플레어(Solar Flare) 등에 의해 발생한다.

근 지구 우주 영역에 존재하는 지구자기장은 이들 두 종류의 대전 입자의 운동에 모두 영향을 끼친다.

#### 4.1. 갇힌 입자 복사

갇힌 입자 복사(Trapped Radiation)는 전자(Electron), 양성자(Proton), 그리고 중이온(Heavier Ion) 등에 의해 발생한다. 이들 입자가 갖고 있는 에너지는 전자의 경우 수십 keV, 양성자의 경우 수십 MeV 정도에 이를 정도로 비교적 크다. 지구 자기장은 이들 대전 입자를 특정 영역에 가두어 놓는 역할을 하는데, 이 영역을 밴앨런대라고 하며, 지자기 적도(Geomagnetic Equator)로부터 대략 위도  $\pm 50^\circ$  영역에 분포한다.

밴앨런대는 크게 내부의 양성자 복사대(Proton Belt)와 외부의 전자 복사대(Electron Belt)로 구분될 수 있다. '그림 7'은 자오선 면을 기준으로 한 전자 및 양성자 복사대의 개략적인 분포이다.

밴앨런대의 일반적인 형상은 지구 자기장의

형상을 따르고 있다. 단, 남대서양 이상지역 (South Atlantic Anomaly, 이하 SAA) 부근의 경우에는 쌍극자기장(Dipole Filed)의 기하학적 형상에 의한 영향으로 정상적인 경우보다 자기장의 세기가 약하다. 따라서 이 지역을 지나는 대전입자는 낮은 고도까지 도달할 수 있게 되고, 위성 운용고도에서의 대전 입자의 밀도는 비정상적으로 높아지게 된다.

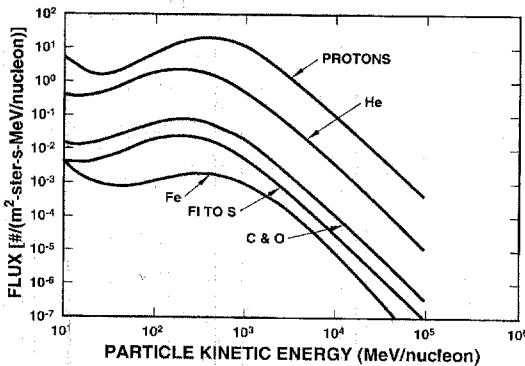


그림 8. GCR의 에너지 분포

궤도가 약 500km인 위성, 특히 SAA를 지나는 위성에 대한 간헐 입자 복사 효과는 대부분 내부 밴앨런대에 갇혀있는 고 에너지의 양성자에 의해 발생한다. 내부 밴앨런대는 대략 위도  $\pm 45^\circ$  영역에 분포하는데, 이 지역에서의 입자 복사의 정도는 경도 및 위도에 따라 달라지며, 내부 밴앨런대에 위치하는 양성자의 양은 태양의 변화에 따라 영향을 받는다.

외부 밴앨런대는 전자 및 양성자를 모두 포함하고 있으나 전자의 밀도가 양성자의 밀도보다 훨씬 높으며, 이 지역에서의 간헐 입자에 복사 효과는 대부분 간헐 전자에 의해 발생한다. 외부 밴앨런대는 태양 반대 방향은 길게 늘어져있고, 태양 방향은 편평한 비대칭 형상이다.

## 4.2 우주선 복사

우주선(Cosmic Ray)이란 태양계 외부 또는 태양으로부터 복사되는 전자, 양성자, 그리고 다양

한 원소의 원자핵 등을 말한다. 우주선 복사는 크게 은하 우주선(Galactic Cosmic Ray, 이하 GCR) 복사와 태양 입자(Solar Energetic Particle, 이하 SEP) 복사로 나눌 수 있는데, GCR이 태양계 외부의 우주에서 생성되어 은하계 전체로 전파되는 반면에 SEP는 태양이나 태양의 플레어(Flare) 등에서 발생하며, GCR보다 에너지 수준이 낮고(약 1 MeV ~ 1GeV/Nucleon) 대부분 양성자 및 알파 입자로 구성되어 있다.

### 4.2.1 GCR 복사

GCR의 대부분은 원소의 원자핵으로 구성되어 있으며 이 외에 약 2 퍼센트 가량의 전자들이 포함되어 있다. 이들의 에너지는 입자 당 10 MeV 이하에서 1016 MeV 이상 정도로 다양하게 분포되어 있다. '그림 8'은 GCR 입자의 에너지를 나타내고 있다.

이들은 멀리 떨어져있는 항성이나 다른 은하계로부터 방출되어 우주로 전파되며, 지구에는 모든 방향으로부터 조사된다. GCR을 구성하고 있는 원소의 원자핵의 비는 태양계를 구성하고 있는 원소의 비와 유사하나 GCR에는 조금 더 무거운 원소들의 핵이 더 많이 포함되어 있다. 무거운 원소의 원자핵의 경우에는 관통 궤적 부근에 비교적 강한 이온화를 야기하므로 비록 소량이 존재하더라도 그 영향은 크며 전자 장비 등에 큰 영향을 끼친다.

GCR의 유입량은 방사원의 위치, 지구 자기장, 지구 대기에 의한 차폐, 그리고 고도 등에 의해 공간적으로 다르게 분포한다. 또한 지구 자기장이 개방되어있는 극지방의 경우에는 이의 유입량이 많다. 지구 자기장은 유입되는 입자의 에너지 수준에 따라 GCR을 일정한 각도로 굴절시킴으로 에너지가 낮은 입자는 지구 자기권을 깊숙이 관통하지 못한다.

태양의 활동이 활발한 시기 즉, 태양계 내의 자기장이 강력하게 형성되는 시기의 경우 GCR 입자는 지구로부터 멀리 산란되므로 GCR 입자의 유입량은 줄어든다. 반대로 태양의 활동이 감

표 1. 반도체 부품의 Total Dose 효과

Part Type	Problem
MOS Transistor	- Threshold voltage shift
Bipolar Transistor	- Decrease of DC gain - Increase of reverse current - Modification of saturation voltage
CMOS IC	- Operational, standby, and leakage current increase - Output level and fanout degradation - Loss of functionality - Noise margin degradation - Timings degradation
Linear IC	- Bias and offset current increase - Increase of offset voltage and change of reference voltage - Degradation of open loop gain and slew rate

소하면 이의 유입량은 증가한다.

일반적으로, 고도가 낮고 경사각이 작은 궤도에서 운용되는 위성은 지구 대기 및 지구 자기장에 의한 차폐효과로 인해 GCR의 조사량이 비교적 적다.

#### 4.2.2 SEP 복사

태양 우주선(Solar Cosmic Ray)으로 불려지기도 하는 SEP는 우주 복사 요인 중 가장 가변적이다. SEP 복사는 대부분 양성자나 알파 입자 등의 무거운 원자핵으로 구성되어있으며, 이들 입자 역시 그 관통 궤적 부근을 이온화시킨다. 이들 입자는 규모가 큰 태양 플레어가 발생할 때에는 10 MeV에서 1000 MeV 정도의 에너지로 가속되기도 하는데, 이는 단기간 중에 발생하는 큰 조사량 증가(수천 배)의 주요 원인이다. 일반적으로 태양으로부터의 SEP 복사는 태양 흑점이 최대가 되었을 때 최대가 된다.

GCR과 마찬가지로, 지구 자기장이 상대적으로 약한 저자기 위도(Geomagnetic Latitude) 63° 이상의 영역에서는 이들 SEP 입자들이 저궤도 높이까지 도달 할 수 있다.

#### 4.3 위성에 대한 투과성 대전 입자의 영향

위성에 대한 투과성 대전 입자에 대한 영향은 크게 Total Dose 효과와 Single Event 효과로 구분될 수 있다. Total Dose 효과는 벤앨런대 내에 갇힌 입자나 SEP와 같이 비교적 낮은 에너지를 갖는 입자의 복사에 지속적으로 노출될 경우 발생하며, Single Event 효과는 GCR이나 SEP와 같이 높은 에너지를 갖는 전하 입자가 위성을 관통하여 지나갈 때 발생한다. 이들에 대한 피해는 대부분 반도체 부품에 집중되어 있는데, 최근 들어 위성이 소형화 되고 상용(COTS)의 고집적 반도체 부품이 자주 사용됨에 따라 환경 요인에 의한 고장 중 많은 부분이 투과성 대전 입자 복사

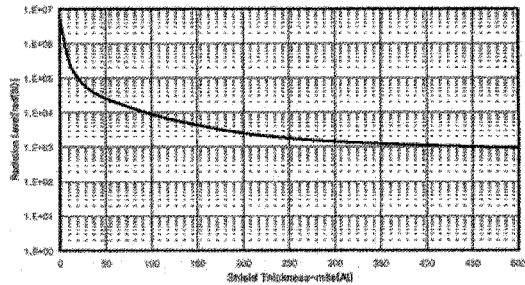


그림 9. Al 차폐 두께에 따른 조사량 감소 [8]

에 기인하는 것으로 알려져 있다.

#### 4.3.1 Total Dose 효과

Total Dose 효과는 주로 벤앨런대에 갇힌 전자나 양성자 혹은 SEP 중의 양성자와 같이 비교적 낮은 에너지를 가진 입자의 이온화 효과(Ionizing Effect)에 의해 발생한다. 이들 입자에 의해 지속적인 복사가 이루어질 경우, 위성 내부의 반도체 부품에는 전하가 생성되고 이들이 반도체 부품의 SiO<sub>2</sub> 또는 Si와 SiO<sub>2</sub> 경계면에 축적된다. 이러한 전하의 축적이 지속적으로 누적될 경우, 아날로그 부품의 Threshold 전압이 바뀌거나 누설 전류가 증가하며, 디지털 부품의 동작 타이밍이 변하는 등 탑재 장비의 고장을 야기한다. '표 1'은 주요 반도체 부품에 대한 Total

표 2. Single Event 효과의 종류

Single Event Effect	Description
SEU, Single Event Upset	Change of information stored
SED, Single Event Disturb	Momentary disturb of information stored in memory bit
SET, Single Event Transient	Current transient induced by passage of a particle, can propagate to cause output error in combinational logic
SEDR, Single Event Dielectric Rupture	Essentially antifuse rupture
SEGR, Single Event Gate Rupture	Rupture of gate dielectric caused by high current flow
SEL, Single Event Latchup	High current regenerative state induced in 4-layer device
SES, Single Event Snapback	High current regenerative state induced in NMOS device
MBU, Multiple Bit Upset	Several memory bits upset by passage of same particle
SEFI, Single Event Functional Interrupt	Corruption of control path by an upset

Dose 효과이다. 이러한 Total Dose 효과는 점진적으로 나타나는 회복 불가능한 현상으로서 전자 부품에 축적되는 전하량은 조사량 외에도 작동 전압 및 온도 등에 따라 변한다.

Total Dose 조사량은 일정 질량의 재료에 흡수된 총 복사 에너지를 표시하는 단위인 Rad로 표시하는데, 1 Rad는 100 erg/g을 의미한다.

Total Dose 효과를 야기하는 입자의 에너지는 비교적 낮으므로 차폐(Shielding) 질량을 증가시켜서 위성 내부 부품에 대한 조사량을 감소시킬 수 있다. '그림 9'는 Al 두께에 따른 Total Dose 조사량의 감소를 나타낸다. 그러나 차폐 질량을 이용하여 전자 부품을 보호하는 데에는 실용적인 한계가 있으므로, Total Dose 효과에 어느 정도의 내성을 가지고 있는 Radiation-Hard 부품이 사용되고 있다.

Total Dose 효과의 주요인인 밴앨런대 복사는 중궤도(Medium Earth Orbit) 높이에서 그 세기가 가장 크므로, 이에 의한 영향 역시 중궤도 위성에서 가장 크다.

### 4.3.2 Single Event 효과

Single Event 효과는 주로 GCR 또는 SEP 복

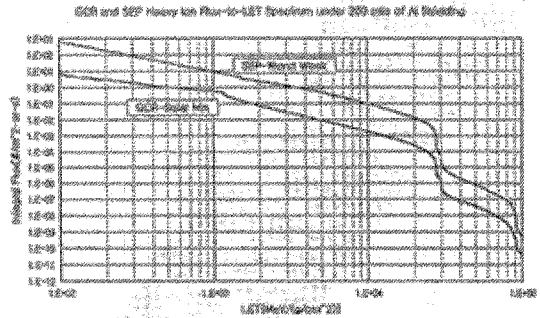


그림 10 GCR 및 SEP 유입량과 LET와의 관계 [8]

사에 포함된 중이온(Heavy Ion)이나 밴앨런대에 갇힌 고 에너지의 양성자에 의해 발생한다. 이들 입자는 상당히 높은 에너지를 가지고 있으며, 이로 인해 투과성이 매우 크다. 따라서 위성의 차폐만으로는 이에 대한 조사량을 크게 줄이지 못한다. 이들 대부분은 위성을 그대로 관통하여 지나가며 그 궤적을 따라 주위를 이온화 시킨다. 이러한 현상이 반도체 부품에서 발생하는 경우, 일시적으로 비트(Bit)의 상태가 바뀌거나 글리치(Glitch)가 생기기도 하고 트랜지스터의 특성을 변화시켜 부품을 영구적으로 손상시키기도 한다. '표2'는 이러한 Single Event 효과의 종류를 나타내고 있다.

이온화된 입자가 물질을 통과하여 지나갈 때, 관통 경로를 따라서 주위에 전달하는 에너지의 양을 Linear Energy Transfer(이하 LET)로 표시한다. 따라서 LET가 큰 입자일수록 주위에 Single Event 효과를 야기하는 경향이 크다. 각 부품마다 Single Event 효과가 나타나기 시작하는 최소 LET 수준(LET Threshold, 이하 LET<sub>th</sub>)이 존재하는데, 부품에 조사되는 입자의 LET가 부품의 LET<sub>th</sub>보다 큰 경우에 Single Event 효과가 나타나기 시작한다. '그림 11'은 한 예로서 양성자의 LET 수준에 대한 반도체 메모리 부품에 대한 SEU 발생확률(Cross Section,  $\sigma$  = Error 빈도 / Ion Fluence)을 나타내고 있다.

저궤도에서의 Single Event 효과는 대부분 태양으로부터 유입되어 밴앨런대에 갇힌 양성자(Trapped Proton)에 의해 발생한다. 따라서 저궤



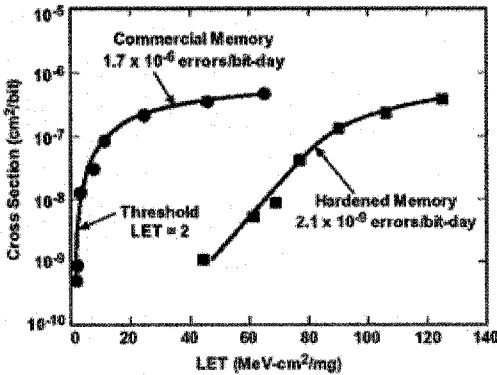


그림 11. SEU 발생 확률과 LET 관계의 예

도 위성의 Single Event 효과 발생률은 태양의 활동과 밀접한 관계가 있다.

## 5. 플라즈마에 의한 영향

플라즈마(Plasma)는 대전 입자 또는 중성 입자로 구성된 준-중성(Quasi-neutral) 가스 응집체이다. 입자의 운동은 지구 자기장 및 태양풍(Solar Wind) 등의 영향을 받아 변하며, 또 반대로 이들의 전체적인 거동 및 운동은 전자기장을 발생시켜 자신의 운동 또는 멀리 떨어져 있는 다른 대전 입자의 운동에도 영향을 미친다.

‘그림 2’에서 볼 수 있는 것과 같이 대략 80km 고도 이하에는 기상 현상이 발생하는 중성 대기의 혼합 층이 존재하며, 이보다 높은 고도에는 태양으로부터의 복사로 인해 부분적으로 이온화된 플라즈마 대기가 존재한다. 이들 플라즈마 대기는 O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He, H, O<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, 그리고 전자 등으로 구성되어 있는데, 플라즈마 대기층은 전기적으로 중성이며 대략 1000 km 고도까지는 O 및 O<sup>+</sup>가 가장 높은 비율로 분포하고 이 이상의 고도에서는 H<sup>+</sup> 및 He<sup>+</sup>가 많이 분포한다.

지구의 플라즈마 환경은 크게 전리층(Ionosphere), 자기권, 그리고 태양풍의 3가지 영역으로 구분된다. 전리층은 자기권내에 포함되어

있는데, 온도가 낮고 다른 층에 비해 밀도가 높으며 상대적으로 O<sup>+</sup>가 많이 존재하는 것이 특징이다. 일반적으로 전리층 영역은 이온의 밀도가 중성 기체의 밀도를 초과하는 시점인 1000 km까지가 해당된다. 전리층의 평균 입자 밀도는 10<sup>9</sup>/m<sup>3</sup>이며 극지방의 경우에는 수 1000 km, 그리고 적도 부근의 경우에는 수 10000 km까지 펼쳐져 있다. 극지방의 오로라(Aurora) 영역을 제외하면 저고도에서의 플라즈마 온도는 약 300K에서 3500K 정도이다[2].

## 5.1 전리층의 플라즈마

전리층 플라즈마는 중성대기의 광이온화(Photoionization)에 의해 생성되거나, 자기권 입자들이 100 km에서 200 km 고도의 열권

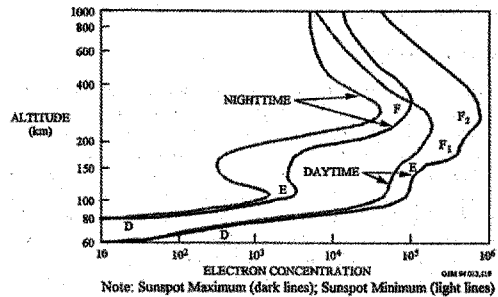


그림 12. 전리층의 고도에 따른 전자 밀도 분포 [2]

(Thermosphere)에서 반응하여 생성된다. 전리층 플라즈마의 운동 역시 지구 자기장의 영향을 받는다. 전리층의 하부 경계는 대략 50 km에서 70 km정도이나 명확한 상부 경계는 존재하지 않는다. 대개의 경우 대략 2000 km 정도를 상부 경계로 설정하고 있다.

전리층의 수직 구조는 밤과 낮, 계절 그리고 위도 등에 따라 끊임없이 변화한다. 전형적인 수직 구조는 ‘그림 12’와 같다.

전리층 플라즈마에 노출된 전기 전도체가 100V 이상의 전위차를 가지는 경우에는 위성의 다른 부위와 방전을 일으킬 수 있으므로 설계상

의 주의가 필요하다. 전리층의 밀도는 저 고도에서 크기 때문에 이러한 효과는 저궤도 위성에서 주로 나타난다.

## 5.2 오로라 플라즈마

오로라(Aurora)는 자기력선을 따라서 지구대기로 유입되는 고 에너지의 대전 입자에 의해 생성된다. 이러한 대전 입자의 유입은 극지적인 플라즈마 밀도의 증가로 나타난다.

고 고도 플라즈마의 에너지는 비교적 높는데, 태양풍에 포함된 전자와 이온의 온도는 각각  $1\sim 5 \times 10^5$  K 및  $10^5$  K 정도이며, 자기권에 포함된 전자와 이온의 온도는 각각  $1\sim 3 \times 10^7$  K 및 108 K 정도에 이른다[2]. 이러한 플라즈마가 지구 대기와 접할 경우 오로라가 발생한다.

## 5.3 위성에 대한 플라즈마의 영향

### 5.3.1 위성의 대전

위성의 대전(Charging) 현상은 크게 표면 대전(Surface Charging)과 내부 대전(Internal Dielectric Charging)으로 구분 할 수 있다. 이중 내부 대전 현상은 고 에너지의 투과성 입자에 의해 발생하며 이에 대한 일반적인 내용은 4.3 절에서 이미 설명되었다. 플라즈마에 의해 발생하는 대전 현상은 주로 표면 대전 현상이다. 또한 이러한 대전 현상은 위성 전체의 전위가 균등하게 변하는 절대 대전(Absolute Charging)과 위치에 따라 다른 전위로 대전되는 상대 대전(Differential Charging)으로 구분될 수 있는데, 위성의 운용 시에 특히 위험한 것은 상대 대전 현상이다.

표 3. 고도에 따른 플라즈마 대전 전위

	Satellite in eclipse, or insulated surface in shadow	Sunlit satellite with conductive surfaces
Plasmasphere (~5R <sub>E</sub> )	-2 V	+2 V
Day side magnetosphere (5~10R <sub>E</sub> )	-5 to -100 V	+10 V
Night side magnetosphere (5~15R <sub>E</sub> )	-20,000 V (during magnetospheric storms)	+30 V
Day side magnetosheath (10~15R <sub>E</sub> )	-200 V	+5 V
Solar wind	-20 V	+10 V

위성의 표면 대전 현상은 몇 가지의 대전 요인 및 전기적 평형을 이루기 위한 작용이 서로 관여하고 있다. 플라즈마에 포함된 전자는 양이온보다 그 질량이 작고 속도가 크므로 더 높은 비율로 위성 표면과 충돌하게 되어 결국 위성의 표면에 음전하가 축적된다. 반대로 위성 표면이 태양에 비취질 경우에는 광전자 방출 효과(Photoemission)에 의해 전자들이 표면으로부터 방출되므로 표면에 양전하들이 축적된다. 또한 위성 표면 주위의 플라즈마는 위성 표면과 전기적 평형을 유지하려는 경향이 있으므로 위성 표면의 전위에 따라 양이온 및 전자를 위성 표면과 교환하기도 한다. 이러한 현상들이 균형을 이루

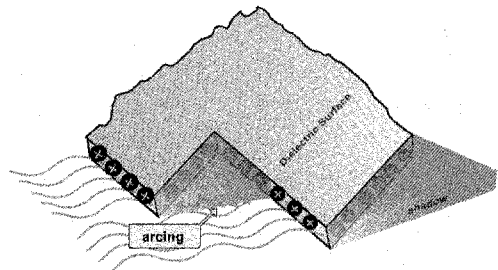


그림 13. 그늘짐에 의한 표면 방전의 예

어 위성 표면의 전위가 결정되는데, 일반적으로 그늘진 부분은 음으로 대전되고 태양이 비치는 부분은 양으로 대전된다.

단일한 도체로 구성되어 있는 구형의 위성의 경우에는 전 외부 표면이 동일한 전위로 대전되는데, 이와 같은 절대 대전은 위성의 운용에 별 다른 영향을 주지 않는다. 그러나 실제로 대부분의 위성의 외부는 태양전지, 센서, 또는 렌즈 등으로 덮여 있고 이들 재료의 전기적 특성은 모두 다르므로, 각 부분은 서로 다른 전위로 대전될 수 있다. 이러한 경우에는 방전(Arcing) 현상이 발생 할 수 있으며, 이로 인해 재료의 물리적인 손상이나 전자기 간섭 현상 등이 야기 될 수 있다. '그림 13'은 이러한 현상의 개념도이다.

'표 3'은 플라즈마 환경에서 평형 상태를 이루었을 때의 각 고도 별 대전 전위를 나타내고 있다.

### 5.3.2 저궤도 고도 위성의 대전

대략 지구반지름의 5배 이내 고도의 저궤도 및 중궤도에 위치한 플라즈마는 상대적으로 밀도가 높고 에너지 수준이 낮으며, 위성의 전기적인 평형은 대개 플라즈마의 기준 전위로부터 수 볼트(Volt) 정도 낮은 수준에서 이루어진다. 따라서 전기적으로 기능을 수행하지 않는 표면의 경우, 대전은 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 태양전지나 도전성 구조물 등이 상당한 전위차를 유지한 채 기능을 수행하는 경우에는 주위의 플라즈마에 의한 방전 현상 등이 발생 할 수 있다.

### 5.3.3 지구 정지 궤도 고도 위성의 대전

정지궤도 고도의 플라즈마 환경은 매우 복잡하고 유동적이다. 정지궤도는 자기권계면(Magnetopause) 부근에 위치하는데, 자기권계면 부근의 입자의 흐름은 에너지 수준이 상당히 높고 자기장 폭풍 등의 활동에 따라 급격하게 변한다. 또한 플라즈마 밀도가  $\text{cm}^3$  당 입자 1개 정도로 매우 낮으므로, 위성 표면에 축적된 전하를 중성화시키기가 어렵다. 따라서 태양 광선의 차폐 여부에 따라서 전위의 차이는 수 kV에 이를 수 있으며, 이러한 높은 전위차는 위성의 운용에 큰 영향을 줄 수 있다.

### 5.3.4 극 저궤도 위성의 대전

극 저궤도의 오로라 지역에는 고 에너지의 입자 흐름이 존재한다. 이들 입자는 투과성이 강하지는 않으나 250 km 부근 고도의 대전에 중요한 역할을 한다. 오로라 지역을 관통하는 위성은 지구 자기권으로부터 유입되어 들어오는 고 에너지의 입자들로 인해 상당한 수준의 음 전위로 대전된다.

협할 수 있는 여러 가지 위험요소가 있다. 특히 원자 산소 및 자외선 복사 등에 의한 재료의 화학적인 변이, 입자 복사에 의한 전기 전자 부품의 고장 등은 위성에 사용되는 재료 및 부품 선정 시에 중용하게 고려되는 요인기도 하다. 특히 저궤도 위성의 경우, 원자산소의 밀도가 비교적 높으므로 이로 인한 산화의 가능성을 고려하여야 하며, 고 에너지의 갇힌 입자에 의한 Total Dose 및 Single Event 현상에 대응하여 한다. 따라서 위성의 설계 시에는 운용궤도에서 예상되는 환경 요인을 적절히 예측하여 이에 대응하는 설계가 이루어지도록 해야 한다.

## 참 고 문 헌

1. ESA-PSS-01-701, Data for selection of space materials, ESA.
2. NASA-CR-4661, Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Material Selection Guide, NASA.
3. NASA-CR-1999-209254, Vehicle/Atmosphere Interaction Glows: Far Ultraviolet, Visible, and Infrared, NASA.
4. NASA-RP-1390, Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment, NASA.
5. NASA-RP-1350, The Natural Space Environment: Effects on Spacecraft, NASA.
6. The Cosmos on a Shoestring: Small Spacecraft for Space and Earth Science, Liam Sarsfield, MR-864-OSTP, 1998.
7. 아리랑1호 임무기간 3년 동안의 궤도변화 분석, 김해동 외, 한국항공우주공학회지, 제 31권 10호.
8. K2-SP-330-001, KOMPSAT 2 Component Environmental Design & Test Spec., 항공 우주연구원.
9. Fundamentals of Space Systems, V. L. Pisacane and R. C. Moore, Oxford University Press, 1994.

## 6. 결 론

이상에서 설명한 바와 같이 우주 환경은 두꺼운 대기층에 의해 보호되는 지표 환경에서는 경