

지구정지궤도 위성의 오동작 사례를 통해 본 우주 환경 영향 분석

이재진^{1†}, 황정아¹, 봉수찬¹, 최호성^{1,2}, 조일현¹, 조경석¹, 박영득¹
¹한국천문연구원 태양우주환경연구그룹
²과학기술연합대학원대학교

Analysis on Space Environment from the Anomalies of Geosynchronous Satellites

Jaejin Lee^{1†}, Junga Hwang¹, Su-Chan Bong¹, Ho-sung Choi^{1,2}, Il-hynn Cho¹,
Kyung-Suk Cho¹, and Young-Deuk Park¹

¹Solar and Space Weather Research Group, KASI, Daejeon 305-348, Korea

²University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: jjlee@kasi.re.kr

(Received October 16, 2009; Accepted November 12, 2009)

요 약

우주 환경이 인공위성의 오동작에 영향을 미친다는 사실은 이미 잘 알려진 것이지만, 구체적으로 인공위성의 오동작이 발생하였을 경우, 이것을 우주 환경에 의한 영향이라고 주장하기는 쉽지 않다. 이는 위성의 오동작 증상이 다양할 뿐만 아니라, 오동작 증상을 재현하는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 이 연구에서는 이러한 위성의 오동작을 통계적으로 분석하여 어떠한 경우에 위성의 오동작이 발생할 확률이 높아지는지 찾고자 하였다. 특히 많은 비용이 소요되며 활용도가 높은 지구 정지 궤도 위성의 오동작 경향을 분석함으로써 위성 운용자에게 유용한 정보를 제공하고자 하였다. Satellite News Digest사에서 제공하는 1997년부터 2008년까지의 위성 오동작 자료를 분석하였는데, 분석 결과 지구 정지 궤도 인공위성은 Kp 지수와는 큰 상관관계를 가지지 않았으며, 봄과 가을에 그리고 자정부터 새벽 시간대에 오동작이 발생할 확률이 높음을 알 수 있었다. 또한 지구 정지 궤도에서의 고에너지 전자의 밀도가 높아질수록 위성의 오동작이 많이 발생했는데, 이러한 경향은 태양 활동 극대기일 때 보다는 극소기 일 때 더 잘 나타났다.

Abstract

While it is well known that space environment can produce spacecraft anomaly, defining space environment effects for each anomalies is difficult. This is caused by the fact that spacecraft anomaly shows various symptoms and reproducing it is impossible. In this study, we try to find the conditions of when spacecraft failures happen more frequently and give satellite operators useful information. Especially, our study focuses on the geosynchronous satellites which cost is high and required high reliability. We used satellite anomaly data given by Satellite News Digest which is internet newspaper providing space industry news. In our analysis, 88 anomaly cases occurred from 1997 to 2008 shows bad correlation with Kp index. Satellite malfunctions were likely to happen in spring and fall and in local time from midnight to dawn. In addition, we found the probability of anomaly increase when high energy electron flux is high. This is more clearly appeared in solar minimum than maximum period

[†]corresponding author

Keywords: satellite, spacecraft, geosynchronous, anomaly

1. 서 론

고도 약 36,000km의 지구 정지 궤도에는 약 360여 개의 위성들이 운용되고 있다. 이들 대부분은 고가의 통신 위성들로 현대 사회를 움직이는 중요한 통신 및 방송 업무를 담당하고 있다. 우리나라도 1995년 무궁화 1호 위성을 발사한 이래, 무궁화 2호, 3호와 현재 무궁화 5호 위성을 (주) KT에서 운용 중에 있으며, 내년 통신해양기상위성을 발사할 예정으로 있는 등, 정지궤도에서 운용되는 위성의 숫자가 늘어날 전망이다.

이러한 지구 정지 궤도 위성이 어떠한 요인에 의해서건 오동작을 일으켜 고유 임무를 수행하지 못한다면, 사용자 입장에서 큰 피해를 입을 수 있다. 대표적인 예가 1994년 발생한 캐나다의 통신위성 ANIK E1과 ANIK E2의 오동작이다(Baker 1998). 이 때 두 위성의 모멘텀 휠(Momentum Wheel)이 정상적인 동작을 하지 못하면서 안테나가 지구를 향하지 못해 정상적인 통신이 이루어 지지 못했다. 이 사건으로 10만명이 넘는 위성 방송 TV 시청자들이 큰 불편을 겪었으며, 지역 신문 기사의 전송이 늦어졌고, 수 많은 전화 사용자들이 피해를 입었다. 또한 위성을 복구하는데 최소 5천만불 이상이 소요됐는데, 그럼에도 불구하고 위성은 예상 수명보다 훨씬 빨리 퇴역할 수밖에 없었다.

ANIK E1과 ANIK E2 위성은 지구 정지 궤도에서 고에너지 전자들이 위성을 대전시키는 것에 의해 문제를 야기한 것으로 판별되었다(Baker et al. 1994). 고에너지 전자는 위성의 외벽을 쉽게 통과하여 위성 내부를 대전시켰다가 순간적이 방전을 통하여 위성 부품을 파괴하는 것으로 알려져 있다(Garrett & Whittlesey 2000, Wrenn 1995, Wrenn & Sims 1996). 한편, Baker(2000)는 유럽의 통신 위성인 MARECS-A의 오동작이 고에너지 전자의 증가와 관련이 있음을 보였다. Farthing et al.(1982)는 NOAA GOES 위성에서 발생한 오동작(False Command)을 분석하였는데, 이러한 오동작이 지자기 활동과 관련이 있으며, 특히 위성의 대전 현상과 관련이 있다고 봤다. 고에너지 전자 외에도 위성의 오동작을 유발하는 여러 요인들이 존재하지만, 모든 위성 사고에 대한 원인 규명이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. Wilkinson(1994)은 NOAA 위성들의 오동작에 대한 자료를 수집하여 이러한 위성의 오동작과 태양 활동과의 관계성을 연구하였으며, Vampola(1994)는 위성 오동작을 분석하는 방법론을 제시하기도 하였다.

지구 정지 궤도 위성들의 일시적인 혹은 영구적인 사고는 일반 사용자들의 관심이 되기 때문에 언론에 종종 보도 되는데, 우주관련 여러 기사들을 모아서 제공하는 Satellite News Digest¹⁾에는 1993년부터 보도된 위성 사고에 대한 자료를 모아 놓고 있다. 여기서 제공하는 통계자료를 보면, 2008년에만 총 9건의 정지궤도 위성의 오동작이 보고되었는데, 이 중 2건은 위성의 동작이 영구적으로 정지하는 total loss에 해당하였다. 이 논문에서는 Satellite News Digest사에서 제공하는 위성 오동작 통계 자료를 바탕으로 어떠한 조건에서 위성이 오동작을 일으키는지 분석하였다. 기존의 논문들은 여러 궤도를 운용하는 위성의 오동작을 통계적으로 분석하거나 한 기관에서 운용하는 위성 자료만을 사용하여 우주 환경에 대한 영향을 분석하고자 하였다(예, Farthing et al. 1982, Wilkinson 1994, Iucci et al. 2006). 그러나 이 논문에서는 지구 정지 궤도 위성의 오동작 자료만을 분석하였으며, 여러 나라에서 운용되는 다양한 위성의 오작에 대한 분석을 수행하였다. 또한 언론에 보도될 정도의 비교적

¹⁾<http://www.sat-index.co.uk>

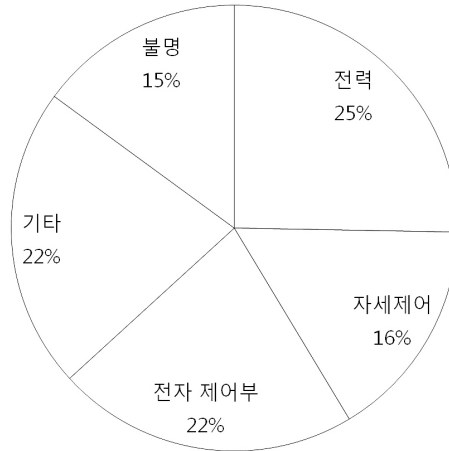


그림 1. 지구 정지 궤도 위성 오동작의 증상별 분포.

치명적인 위성의 오동작에 대한 분석만을 수행하였다. 이를 통해 지구 정지 궤도 위성 운용자들에게 유용한 정보를 제공하는 것을 목적으로 하였다.

2. 지구정지 궤도 위성 오동작 자료

Satellite News Digest사에서 제공하는 위성사고 자료는 지구 정지 궤도 위성에 대한 것뿐만 아니라, 저궤도 위성에 대한 자료까지 포함하고 있다. 지구 정지 궤도 위성과 저궤도 위성은 궤도 차이가 크기 때문에 오동작 발생 원인이 다를 것으로 생각하였다. 따라서 우리는 지구 정지 궤도 위성에 대해서만 통계적인 분석을 수행하였는데, 1997년부터 2008년까지 총 88건의 위성 사고가 보고되었다. 물론 이 기간 동안 훨씬 많은 위성 사고가 발생하였을 것으로 추측되지만, 위성 사고가 경미하거나, 보안을 요구하는 군사 목적의 위성일 경우, 이러한 사고에 대한 보고가 공개되지 않는다.

총 88건의 위성 사고를 증상 별로 분류해 보면 그림 1과 같다. 태양 전지를 포함한 전력부 문제가 25%, 자세 제어 문제가 16%, Onboard Computer를 포함한 전자 제어부 문제가 22%를 차지한다. 이것 외 센서나 태양 전지판 전개부 문제 등 기타 문제가 22%, 특별히 언급되지 않아 문제를 알 수 없는 경우가 15%에 달했다.

3. Kp 지수에 대한 위성의 오동작 분포

앞에서 언급한 ANIK E1과 ANIK E2의 경우처럼, 지구 정지궤도 위성은 우주 환경에 의해 오동작을 일으킬 수 있다. 우주 환경을 정의하는 여러 요소 가운데, 가장 일반적으로 사용될 수 있는 것이 Kp 지수이다. Kp 지수는 극지방 자기장의 변화를 지수화 한 것으로 우주 공간과 지구와 연결된 자기장을 따라 흐르는 전류의 세기를 나타낸다. Kp 지수는 1부터 9등급으로 분류되는데, Kp 지수가 크면 우주 폭풍이 발생했다고 하고, 이와 관련된 여러 사고가 보고되고 있다. 따라서 Kp 지수가 클 때 인공위성에 미치는 우주 환경 영향도 커질 것이라고 생각하기 쉬우나, 그림 2에서 나타낸 것과 같이 위성의 오동작과 Kp 지수는 뚜렷한 상관관계를 보이고 있지는 않다. 그림 2는 위성의 오동

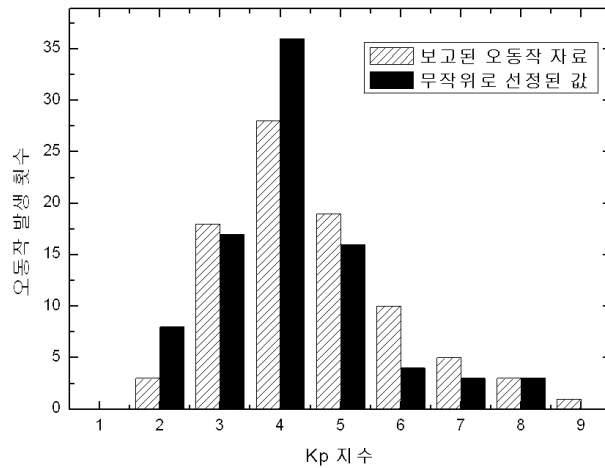


그림 2. Kp 지수에 대한 지구 정지 궤도 위성의 오동작 분포.

작과 Kp 지수의 상관관계를 알아보기 위해 위성의 오동작이 발생한 날의 앞의 3일, 뒤의 2일 중 Kp 지수가 가장 큰 값을 취하여 위성의 오동작 발생 회수를 나타낸 그림이다. 여기서 위성의 오동작 발생 2일 뒤의 Kp 지수를 고려한 것은 아직 명확하게 밝혀지지 않았지만, 우주 폭풍이 발생하기 바로 전 위성의 오동작이 많이 보고되고 있기 때문이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Kp 지수가 4정도 일 때 위성 피해가 가장 컸다. 그러나 이러한 결과가 바로 Kp 지수와 인공위성 오동작 사이의 연관성을 설명해 주는 것은 아니다. 왜냐하면 Kp 지수가 4인 날이 가장 많다면 이 날 위성이 오동작을 일으킨 횟수가 많다는 것은 당연한 결과이기 때문이다. 따라서 우리는 무작위로 날을 골라서 위성의 오동작이 발생한 날과 같이 비교해 보았다. 결과는 위성 오동작이 발생한 날이나, 무작위로 선택한 날이나 Kp 지수분포는 크게 다르지 않다는 것이다. 그림 2의 결과를 분석함에 있어 강조하고 싶은 것은 이러한 결과가 Kp 지수와 위성 오동작과의 연관성을 완전히 배제하는 것은 아니지만, 적어도 위성 운용자의 입장에서 본다면, Kp 지수 뿐만 아니라 위성에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 우주 환경을 함께 고려하여 위성을 운용할 필요가 있다는 것이다.

4. 정지궤도 위성 오동작의 계절적 시간적 변화

앞에서 언급하였듯이 위성의 오동작은 Kp 지수로 표현되는 우주 폭풍과는 큰 연관성을 보이지 않는 것으로 나타났다. Kp 지수는 극지역으로 흐르는 전류를 지수화 한 것으로 위성에 영향을 미치기 어려운 저에너지 입자(<10 keV)에 의한 기여도가 크기 때문에 Kp 지수와 위성의 오동작 사이에는 직접적인 연관성이 적을 수 있다. 그러나 이러한 결론이 우주 환경에 의한 위성체 오동작 영향 자체를 배제하는 것은 아니다. 우주 환경은 Kp 지수 외에 여러 다른 요소들로 표현되며 이러한 우주 환경 요소들의 복잡한 상호 작용에 의해 인공위성 오동작을 분석하는 것이 필요하다 Vampola(1994).

그림 3은 계절에 따른 위성 오동작 발생 횟수를 나타낸다. 여기서 봄은 3월, 4월, 5월로, 여름은 6월, 7월, 8월로, 가을은 9월, 10월, 11월로, 겨울은 12월, 1월, 2월로 정의하고 위성의 오동작 경향성을 분석하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 위성은 봄과 가을에 여름과 겨울에 비해 약 2배 정도 오동

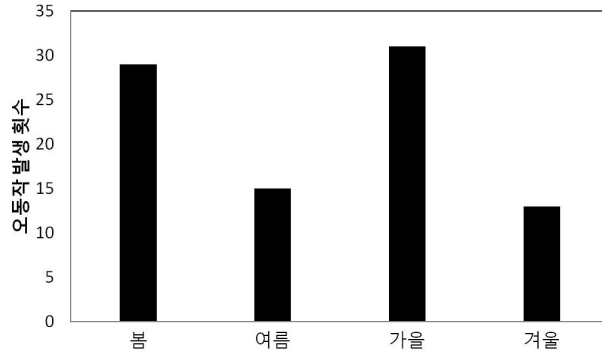


그림 3. 계절에 따른 위성의 오동작 분포.

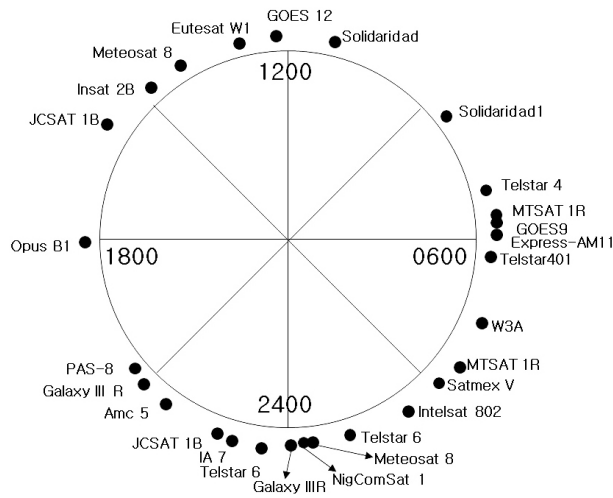


그림 4. 지역시(Local Time)에 대한 지구 정지 궤도 위성의 오동작 발생 분포.

작 발생횟수가 증가하는 것을 알 수 있다. 각각의 위성 오동작 증상은 계절에 큰 상관이 없는 것으로 나타났는데, 이것은 각 증상에 대한 데이터가 아직 충분히 확보되지 못한 결과일 수 있다. 비슷한 결과가 다른 위성의 오동작 발생 분석에서도 보고가 된 적이 있으며, 행성간 자기장 방향과 지구 자전 축과의 각도에 의해 계절적 변화가 발생할 수 있다고 추정되나, 아직 정확한 이유는 알려지지 않고 있다(Wrenn et al. 2002).

한편 그림 4는 지역 시(Local Time)에 대한 위성 오동작 분포를 나타내고 있다. 위성이 오동작을 일으킨 시간 정보는 모든 위성에 대해 제공되지 않았기 때문에 여기서는 시간에 대한 정보를 파악할 수 있는 27개 위성에 대해서만 분석을 수행하였다. 그림 4에서 나타낸 것과 같이 밤 9시부터 아침 9시 사이에 19개의 위성이 오동작을 일으킨 반면 낮 시간 동안에는 단지 8개의 위성이 오동작을 일으킨 것으로 보고되었다. 이렇게 밤 시간 동안 위성이 오동작을 일으킬 확률이 높은 것은 위성의 대전 현상과 관련이 있는 것으로 생각된다. 이렇게 생각하는 근거는 Bodeau et al.(1989)이 유럽

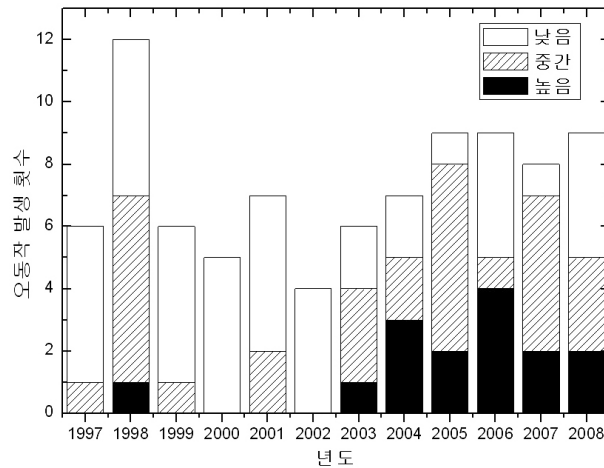


그림 5. 고에너지(2MeV) 전자의 플럭스가 높을 때($> 1000\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$), 중간($1000\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 에 걸쳐 있을 때), 낮을 때($< 1000\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$) 위성의 오동작 발생 빈도.

의 MARECS 위성을 이용하여 지구 정지 궤도 위성의 대전현상을 관찰하였는데, 그림 4에서와 같이 밤 시간 동안에 위성의 대전 현상이 많이 나타남을 관찰할 수 있었기 때문이다. 그러나 위성의 오동작이 왜 계절적 혹은 지역 시 의존성을 갖는지 아직 분명하지는 않다. 단지 이렇게 계절이나 지역 시에 의존하는 것은 인공위성 제조 과정이나 운용 중에 발생한 사람의 실수에 의한 것이라기보다는 우주환경의 변화와 깊은 연관을 가지고 있다는 것을 암시하는 것으로 생각된다. 이에 대한 연구가 Vampola(1994)나 Iucci et al.(2006) 등에 대한 진행되었지만, 아직 명확한 결론에 이른 것은 아니다. 앞으로 위성의 우주환경 자료 분석과 같은 추가적인 분석이 필요하다.

5. 고에너지 전자와 위성 오동작 상관 관계

위성의 대전 현상은 표면 대전(Surface Charging)과 내부 대전(Internal Charging)으로 나누어 생각할 수 있다. 표면 대전 현상은 비교적 에너지가 낮은 입자들이 위성 표면의 부도체 물질에 달라붙어 위성을 대전 시킨 후 갑자기 방전을 일으키면서 위성 부품을 파괴하는 현상을 일컫고, 내부 대전은 비교적 높은 에너지를 갖는 전자들이 위성 외벽을 뚫고 내부로 침투하여 부도체 물체에 쌓였다가 방전을 일으키면서 위성의 부품을 파괴하는 현상을 말한다. 표면 대전은 위성의 태양 전지 판 같은 외부에 노출된 부품에 위협적이고, 내부 대전은 내부의 제어 컴퓨터 등 전자 부품에 위협적이다. 지구 정지 궤도 위성의 경우, 수 백 V까지 쉽게 위성이 대전될 수 있는 것으로 알려져 있다.

내부 대전 현상의 경우, 고에너지 전자의 분포와 직접적인 관련이 있을 것으로 생각되는데, 이러한 관계를 알아보기 위해 고에너지 전자가 높은 플럭스를 유지하고 있을 때 위성이 오동작을 일으킨 횟수를 그림 5에 나타내었다. 여기서 고에너지 전자는 2MeV 이상되는 에너지를 갖는 전자로 정의하였으며, 각 위성들이 오동작을 일으킨 위치에서의 전자 밀도를 알 수 없기 때문에 미국의 기상 위성인 GOES 위성에서 관측한 데이터를 이용하여 각 위성에 대한 전자 밀도를 유추하였다. 그림 5에서 위성

의 오동작이 발생한 날, GOES 위성에서 관측한 2MeV 이상인 전자의 플럭스가 $1000\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 이상을 유지하고 있으면 High, 그 이하를 유지하고 있으면 Low, 이 기준을 사이에 두고 변하면 Middle이라고 정의하였다. 우선 이 그림에서 1997년부터 2008년 까지 위성의 오동작 발생 횟수는 크게 바뀌지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 태양의 활동이 극대기인 2000년경이나 극소기인 2008년이나 위성의 오동작 횟수는 크게 다르지 않다는 것을 의미한다. 그런데 1998년을 제외하고 태양 활동 극소기로 갈수록 고에너지 전자 밀도가 높은 날 위성이 오동작을 일으키는 횟수가 증가함을 알 수 있다.

태양 활동 극대기일 때는 CME(Corona Mass Ejection)와 같은 태양의 활동에 의해 지구 자기권 자기장에 많은 변화를 주게 되는데, 이러한 변화에 의해 지구 자기권에 포획된 고에너지 전자들은 쉽게 지구 대기권으로 침투하거나 자기권 경계면 밖으로 탈출할 수 있다. 반면, 태양 활동 극소기일 때는 태양에서 주기적으로 발생하는 고속 태양풍에 의해 지구 자기장에 포획된 전자들이 가속되며, 자기권은 안정된 상태를 유지하기 때문에 고에너지 전자 플럭스가 높은 기간이 길다(Kataoka & Miyoshi, 2006). 따라서 고에너지 전자에 대한 위성체 영향도 태양 활동 극소기일 때 오히려 증가할 것으로 생각된다. 이것에 의해 그림 5에서 나타난 것과 같이 태양 활동 극소기일 때 고에너지 전자에 의한 위성 오동작 횟수가 증가 하는 것으로 이해된다. 적어도 그림 5를 통해 분명히 알 수 있는 것은 태양 활동 극소기일 때 고에너지 전자가 위성체 오동작에 영향을 미칠 확률이 높다는 것이다.

6. 요약 및 결론

이상에서 지구 정지 궤도 위성과 우주 환경과의 관계에 대해 알아보았다. 지구 정지 궤도 위성은 대부분 고가이고 한번 고장을 일으키면 많은 피해를 입히기도 한다. 그러나 위성 오동작 원인을 정확히 분석하고 파악하는 것은 적어도 현 시점에서는 매우 어렵다. 그러므로 위성 운용자는 항상 세심한 주의를 기울일 필요가 있는데, 이 연구 결과는 위성 운용자에게 몇 가지 유용한 정보를 제공해 줄 것으로 생각된다. 그것은 봄과 가을, 밤 시간 동안에, 그리고 지구 정지 궤도의 고에너지 전자의 플럭스가 증가했을 경우(적어도 태양활동 극소기일 때), 위성의 오동작 발생 가능성이 높다는 것이다. 이러한 시간대에 위성 운용자들이 위성 운용에 보다 세심한 주의를 기울인다면 위성의 안정적인 운용에 도움이 될 것이라 생각된다.

감사의 글: 이 논문은 한국천문연구원의 “우주환경예보센터구축사업”의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Baker, D. N. 1998, *Advances in Space Research*, 22, 7
- Baker, D. N. 2000, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28, 2007
- Baker, D. N., Kanekal, S. G., Blake, J. B., Klecker, B., & Rostoker, G. 1994 *EOS, Trans., Amer. Geophys. Union*, 75, 401
- Bodeau, J. M., Elkman, W. R., Diaz, J. F., Hansen, D. P., Kirsten, C., & Stevens, N. J. 1989, in *Energy Conversion Engineering Conference 1989* (Washington DC: AIAA), p.375
- Farthing, W. H., Brown, J. P., & Bryant, W. C. 1982, *NASA Technical memorandum 83908*
- Garrett, H. B. & Whittlesey, A. C. 2000, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28, 2017
- Iucci, N., Dorman, L. I., Levitin, A. E., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Ptitsyna, N. G., Villoresi,

- G., Chizhenkov, G. V., Gromova, L. I., Parisi, M., Tyasto, M. I., & Yanke, V. G. 2006, *Advances in Space Research*, 37, 184
- Kataoka, R. & Miyoshi, Y. 2006, *Space Weather*, 4, S09004
- Vampola, A. L. 1994, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 31, 154
- Wilkinson, D. C. 1994, *Journal of Spacecraft and Rocket*, 31, 160
- Wrenn, G. L. 1995, *J. Spacecraft and Rockets*, 32, 514
- Wrenn, G. L., Rodgers, D. J., & Ryden, K. A. 2002, *Annales Geophysicae*, 20, 953
- Wrenn, G. L. & Sims, A. J. 1996, *AGU Geophysical Monograph*, 97, 275.