

KOMPSAT-I으로 관측한 저위도 이온층 밀도 급상승 현상에 대한 연구

박재홍[†], 이재진, 이은상, 민경욱
한국 과학 기술원 물리학과

PRELIMINARY STUDY ON THE ABRUPT DENSITY ENHANCEMENT IN LOW LATITUDE REGION DETECTED BY KOMPSAT-I

Jaeheung Park[†], Jae-jin Lee, Ensang Lee, and Kyoung-Wook Min
Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea
E-mail: jhpark@space.kaist.ac.kr

(Received November 5, 2002; Accepted November 30, 2002)

요 약

SPS(Space Physics Sensor)는 1999년 발사된 다목적 실용 위성 1호(KOMPSAT-I)에 실린 관측 장비로서, 태양 활동 극대기인 2000년 6월부터 2001년 8월까지 지구 이온층에 관한 자료를 지구로 전송하였다. 이 자료 중 때때로 저위도 지역에서 급격한 플라즈마 밀도 증가 현상을 볼 수 있었다. 이러한 현상의 통계적 분포를 살펴본 결과, 지구 자기장이 약한 대서양 지역과 하와이 지역에서 발생 확률이 가장 높으며, 지자기 활동성 지수인 Dst나 태양 활동성을 나타내는 F10.7 지수와는 특별한 상관관계가 없다는 사실을 확인할 수 있었다. 밀도 증가 지역 내의 전자 온도 변화는 개별 사건마다 증가, 유지, 또는 감소를 보이고 있으나, 온도가 급격히 감소하는 경우가 지배적이었다.

ABSTRACT

SPS(Space Physics Sensor) onboard the KOMPSAT-I, which was launched at 1999, had transmitted ionospheric plasma density and electron temperature during the solar maximum from June 2000 to August 2001. SPS IMS onboard KOMPSAT-I occasionally detected abrupt plasma density enhancement in low-latitude region, in which the plasma density abruptly increases in a narrow region. Statistical analysis of the data obtained during the entire operational period shows that the occurrence probability of these events has its peak value at the Atlantic region and at the Hawaiian region where the geomagnetic field strength is weak. And the occurrence frequency has no correlation with Dst index or F10.7 index. The correlation between plasma density and the electron temperature shows a wide variety, but the anti-correlated cases are dominant.

Keywords: equatorial F region, topside ionosphere

[†]corresponding author

1. 서 론

일몰 이후의 저위도 이온층 F 지역에서는 다양한 형태의 밀도 불균일 지역이 나타나는데, 이들은 적도 이온층과 관련된 라디오 통신 및 GPS 등에 장애를 일으키게 된다. 그 중 대표적인 것이 equatorial bubble 또는 equatorial spread-F(ESF)라 불리는 것으로, 이는 수 미터에서 수백 킬로미터의 크기를 갖는 플라즈마 밀도 급감 지역을 말한다(Kil & Heelis 1998). ESF에 대한 연구는 그간 여러 방면에서 이루어져 왔는데, 컴퓨터 모의 실험을 통한 이론적 연구 결과(Hysell et al. 1994, McDaniel & Hysell 1997, Hysell & Shume 2002)는 물론, 이온층 탐사 로켓의 자료 분석(Jahn et al. 1997)이나 위성 관측을 통한 연구(Oyama et al. 1988, Hanson & Urquhart 1994, Huang et al. 2001), 대기광 관측(Kim et al. 2002) 등이 여러 차례 수행되었다. 현재까지 정립된 이론에 의하면, equatorial bubble은 충돌 레일리-테일러 불안정성(collisional Rayleigh-Taylor instability)이 작은 초기 섭동을 증폭함으로써 중력 에너지를 발산하는 현상이며, 태양 활동성(solar activity Huang et al. 2001, Whalen 2002), 지자기 활동성(geomagnetic activity: Huang et al. 2001, Whalen 2002), 중성풍(neutral wind: Mendillo et al. 2001, Devasia et al. 2002), 계절(Aarons 1991) 등의 많은 인자에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다. 또한, 이 현상은 지구 자기력선을 따라 정렬된 형태를 띠고 있으며, 일반적으로 수직방향의 긴 통로에 의하여 F 지역 하부와 연결되어 있다.

그러나, 저위도 이온층 F 지역에서 때때로 발견되는 밀도 급상승 현상은 그 빈도가 낮은 연유로 인하여 관심의 대상이 되지 못하였고, 그에 관련된 논문 또한 거의 발표되지 않았다. 그러나, 1981년 발사된 일본의 과학 위성 Hinotori는 일찍이 이러한 현상을 발견한 바 있으며(Watanabe 2002), 타이완의 위성 ROCSAT-I 또한 이러한 현상을 관측하였다(Watanabe 2002). 이 논문에서는 다목적 실용 위성(KOMPSAT-I)의 과학 탑재체인 SPS-IMS(Space Physic Sensor - Ionospheric Measurement System)에 관측된 저위도 이온층 밀도 급상승 현상에 대하여 논하고자 하며, 이러한 현상의 지리적 분포, 지자기 활동성과의 관계, 밀도 상승 지역내의 전자 온도 변화등에 중점을 둘 것이다.

2. 관 측

SPS(Space Physics Sensor)는 1999년 12월 21일에 발사된 다목적 실용위성 1호(KOMPSAT-I)에 실려 있는 과학 탑재체이다. SPS는 고에너지 입자를 관측하는 HEPD(High Energy Particle Detector)와 이온층의 열전자를 관측하는 IMS(Ionosphere Measurement System)로 구성되어 있다. IMS는 다시 4초의 분해능을 갖는 원통형 랑튀어 탐침(LP)과 1초의 분해능을 갖는 전자 온도 센서(ETS)로 구분된다. 우리는 IMS를 통하여, 이온층의 플라즈마 밀도와 전자 온도, 부동 전위에 관한 정보를 동시에 수집할 수가 있다. KOMPSAT-I은 태양 동기 극궤도(sun-synchronous polar orbit)를 돌고 있기 때문에, SPS IMS는 1050LT의 일정한 지방시에 고정된 상태로 고도 685km의 이온층 상부를 관측한다(Lee 2002). 한편, 이와 비교하게 될 일본의 Hinotori와 대만의 ROCSAT-I은 모두 궤도 경사각이 작은 적도 궤도 위성이다. SPS는 2000년 6월 28일부터 2001년 8월 1일까지 1년여의 기간동안 운용되었다. 그림 1은 운용 기간동안 다목적 실용위성 1호가 적도를 통과한 회수를 경도 구간별로 나누어 표시한 그래프이다.

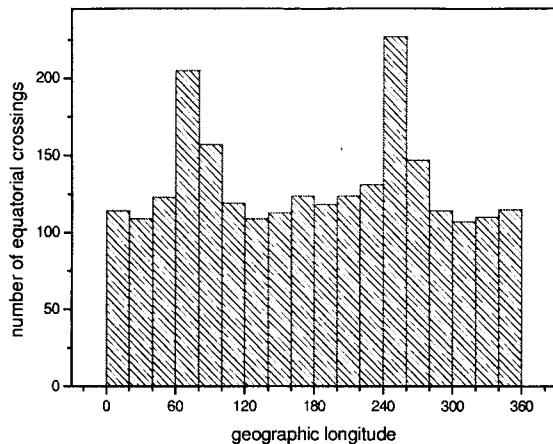


그림 1. 운용 기간동안 다목적 실용 위성 1호가 경도 구간별로 적도를 통과한 회수.

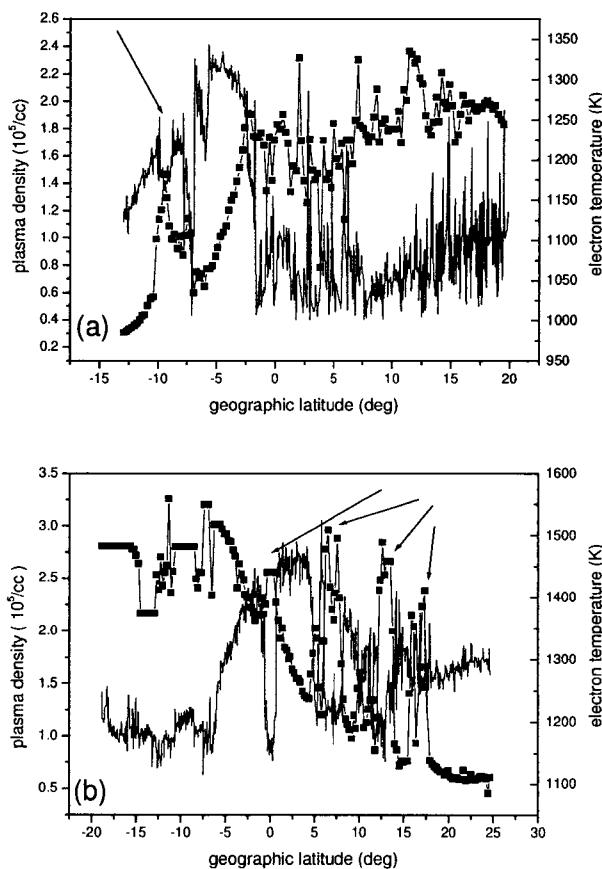


그림 2. 저위도 지역에서 발견되는 플라즈마 밀도 급상승 현상의 전형적인 예. 검은 점은 냉뒤어 탐침을 이용하여 4초 간격으로 측정한 플라즈마 밀도이며, 가는 파선은 전자온도 탐침(ETS)을 이용하여 1초 간격으로 측정한 전자온도이다.

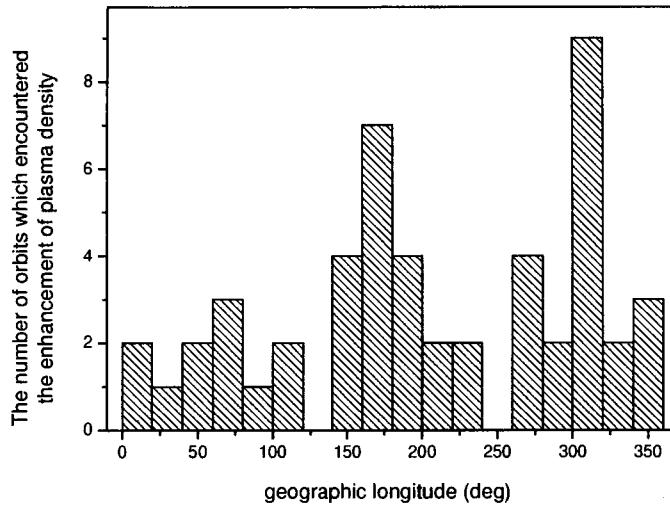


그림 3. 경도 구간에 따라 나눈 밀도 급상승 현상의 분포. 하와이 지역(경도 180도 부근)과 대서양 지역(경도 300도 부근)에서 극대값을 갖음을 확인할 수 있다.

3. 결 과

그림 2는 저위도 지역에서 발견되는 플라즈마 밀도 급상승 현상의 전형적 예이다. 그림 2(a)에서는 위도 ~10도 부근에서부터 위도 5도 정도의 범위에서 밀도 상승 지역이 존재하며, 그림 2(b)에서는 위도 0~20도 부근에 여러 개 존재한다. 이들을 화살표로 표시하였다. SPS IMS는 운용 기간동안 총 50개의 궤도에서 이 같은 현상을 관측하였다. 이 때 다음의 판정 기준을 적용하였으며, 이를 만족하지 못하는 사건은 제외하였다.

- (i) 위도상으로 수 도(degree)의 좁은 영역을 차지한다. 즉, 극대와 극소 사이가 15도 가량 떨어져 있는 EIA(Equatorial Ionisation Anomaly) 현상과 명확히 구분되는 작은 영역을 차지하여야 한다.
- (ii) 급상승한 밀도의 최대값은 주변 플라즈마 밀도의 1.3배 이상이어야 한다.
- (iii) 단 한 점에서 밀도가 급격히 상승하는 경우는 제외하였다.

3.1 지리적 분포(경도에 따라)

그림 3에 저위도 지역에서 발생하는 플라즈마 밀도 급상승 현상의 회수를 경도 구간에 따라 표시하였다. 그림에서 보듯이, 사건의 발생 회수가 경도 180도 부근의 하와이와 경도 300도 부근의 대서양의 두 지역에서 극대값을 이루고 있다. 그림 4는 밀도 급상승 현상의 발생 회수를 KOMPSAT-I의 총 운용 궤도수로 나누어 준 것으로서, 해당 경도 구간에서 밀도 상승 현상이 발생할 확률을 나타낸다고 할 수가 있다. 이 역시 그림 3과 마찬가지로 두 지역에서 명확한 극대값을 갖고 있으며, 기타의 태평양 지역에서는 2% 미만의 발생 확률을 보인다. 밀도 상승 현상이 이 같은 분포를 보이는 이유는 명확하지 않으나, 대서양 지역과 하와이 지역 모두 지구 자기장의 이상을 보이는 지역임을 미루어 볼 때(Oyama et al. 1988), 지자기 이상이 이 현상을 발생시키는 데에 중요한 역할을 한다는 것을 추측할 수 있다.

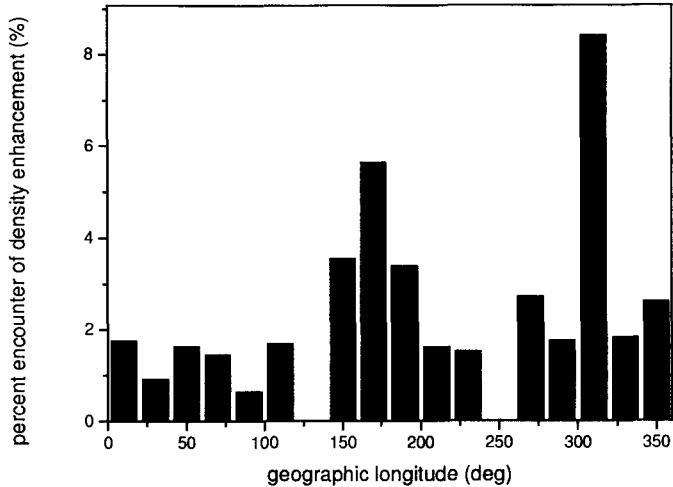


그림 4. 저위도 이온층 밀도 급상승 현상의 발생 확률. 그림 3에 보인 경도별 밀도 급상승 현상 회수를 다목적 실용위성 1호의 총 운용 궤도수로 나누어 준 것이다. 그림 3과 동일한 위치에서 극대값이 발생한다.

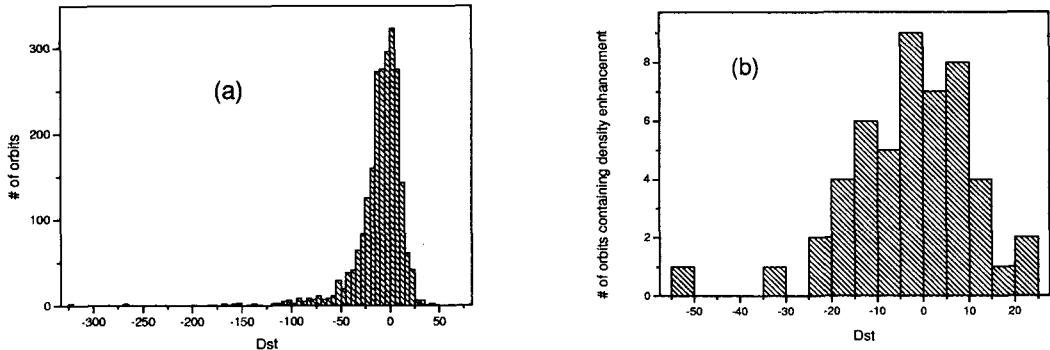


그림 5. (a) 각 Dst 구간별로 나눈, 다목적 실용 위성 1호의 총 운용 궤도수, (b) 각 Dst 구간별로 나눈, 저위도 이온층의 밀도 급상승 현상 발생 궤도수.

3.2 지자기 활동성 지표인 Dst와의 관계

그림 5(a)와 (b)는 각각 다목적 실용 위성의 총 운용 궤도수와 이온층 밀도 급상승 현상의 회수를 나타낸 것인데, 지자기 활동성을 나타내어 주는 지표인 Dst값에 따른 분포를 표시한 것이다.

앞 결과 마찬가지로, 이 두 개의 그림을 이용하여, 주어진 Dst 구간 내에서 밀도 급상승 현상이 발생할 확률을 계산할 수가 있는데, 그 결과가 그림 6에 표시되어 있다. 그림 6에서 보듯이, 밀도 급상승 현상의 발생 확률과 Dst 지표는 어떤 분명한 상관 관계를 보이지 않는다. 이 두 양사이의 상관 계수는 0.22로 매우 낮다. 따라서 이 현상은 지구의 자기 폭풍 등 지자기 교란 현상에 의하여 발생되는 것은 아니라는 추측을 할 수가 있다.

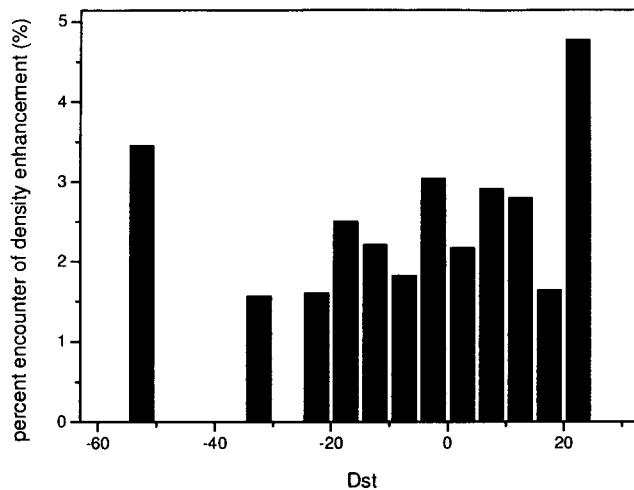


그림 6. 저위도 지역 이온층의 밀도 급상승 현상 발생 확률과 Dst 지표 사이의 상관 관계.

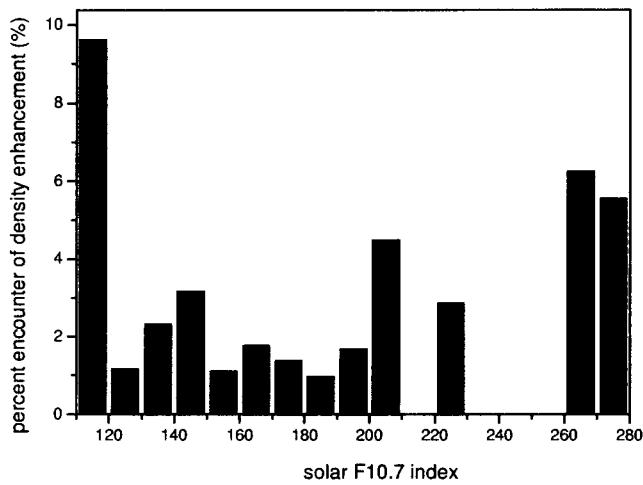


그림 7. 적도 지역 이온층에서 발견되는 플라즈마 밀도 급상승 현상의 발생 확률과 F10.7 지표사이의 상관 관계. 두 사이에 명확한 상관관계가 보이지 않는다.

3.3. 태양 활동성인 F10.7 지표와의 관계

역시 앞 절에서와 마찬가지로, 저위도 이온층에서 밀도 급상승 현상이 발생할 확률과 태양 활동성을 나타내 주는 지표인 F10.7 값과의 관계를 그림 7에 나타 내었다. 그림 7에서 보듯이 그림 6의 Dst와의 관계와 마찬가지로 어떤 상관 관계도 나타나 있지 않다. 두 양의 상관 계수는 -0.13으로 무시할 만하다. 따라서, 밀도 급상승 현상과 태양 활동성은 서로 무관하다는 결론을 잠정적으로 얻을 수가 있다.

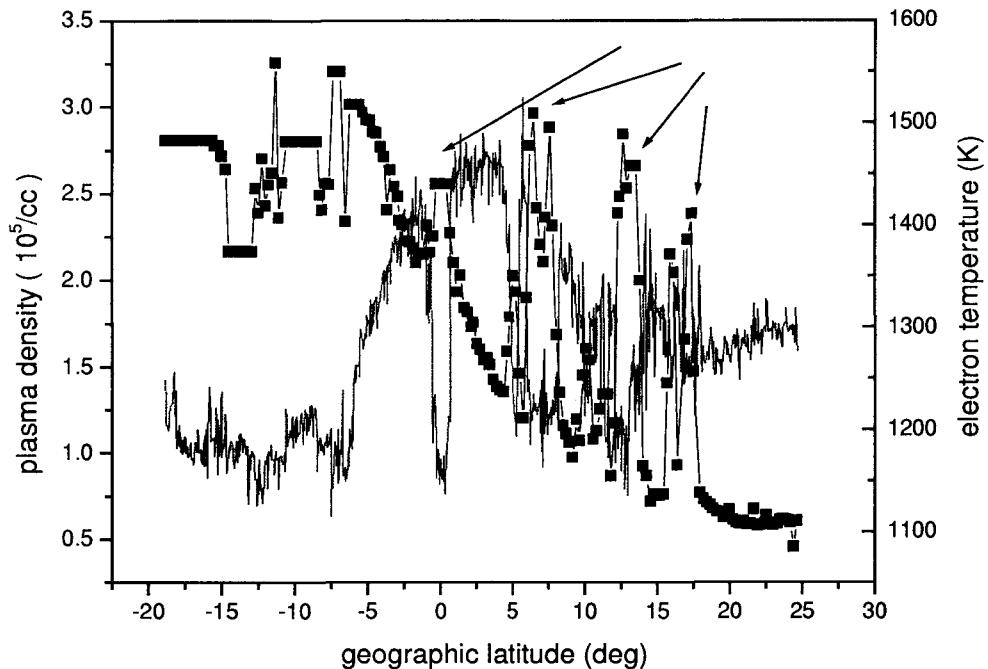


그림 8. 밀도 급상승 지역 내에서의 전자 온도 변화. 검은 점은 전자 밀도, 가는 파선은 전자 온도를 표시한다. 위도 0 ~ 20도 사이에서 플라즈마 밀도 급상승 지역을 다수 관찰할 수가 있다.

3.4 밀도 상승 지역 내에서의 전자 온도 변화

위도에 따른 전자밀도와 온도 변화를 그림 8 ~ 10에 제시 하였다. 모든 그림에서 점이 찍힌 검은 선은 랑비어 탐침으로 얻은 4초 간격의 플라즈마 밀도를, 가는 파선은 전자온도 검출기로 얻은 1초 간격의 전자 온도를 나타낸다. 이 두 양 사이에 항상 일정한 관계가 존재하는 것은 아니라는 사실을 그림 8 ~ 10을 통하여 알 수가 있다. 밀도 상승 지역 내에서 전자온도가 상승하는 경우는 물론, 감소하는 경우와, 현상 유지되는 경우 모두가 SPS IMS에 의하여 관측되었다.

그림 8은 밀도 상승 지역 내에서 전자온도(가는 파선)가 급격히 감소하고 있는 예이다. 전자 온도의 감소 폭은 자료에 실린 잡음의 크기(약 50K)에 비하여 매우 크기 때문에, 이는 잡음에 의한 허상이 아닌 하나의 사실로 판단되어야 할 것이다. 그림 우측 부분에 존재하는 밀도 급상승 지역에서, 전자의 밀도와 온도는 대략 반상관관계(anti-correlation)에 있다고 할 수가 있다.

그림 9는 앞의 그림과 사뭇 다른 경향을 보이고 있는데, 위도 28도 부근의 밀도 급상승 지역에서 전자 온도가 플라즈마 밀도와 마찬가지로 급격히 상승하고 있으며, 그 증가 폭은 약 100K 정도이다. 앞의 경우에 비하여 잡음 크기(noise level)가 크기는 하나, 그림에서 가는 파선의 중심에 진하게 표시된 4초의 이동 평균(moving average) 값으로 볼 때, 밀도 상승 지역 내에서 전자 온도가 분명히 상승하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 밀도 급상승 현상의 또 다른 예이다. 이전의 그림 8과 9와는 달리 플라즈마 밀도와 전

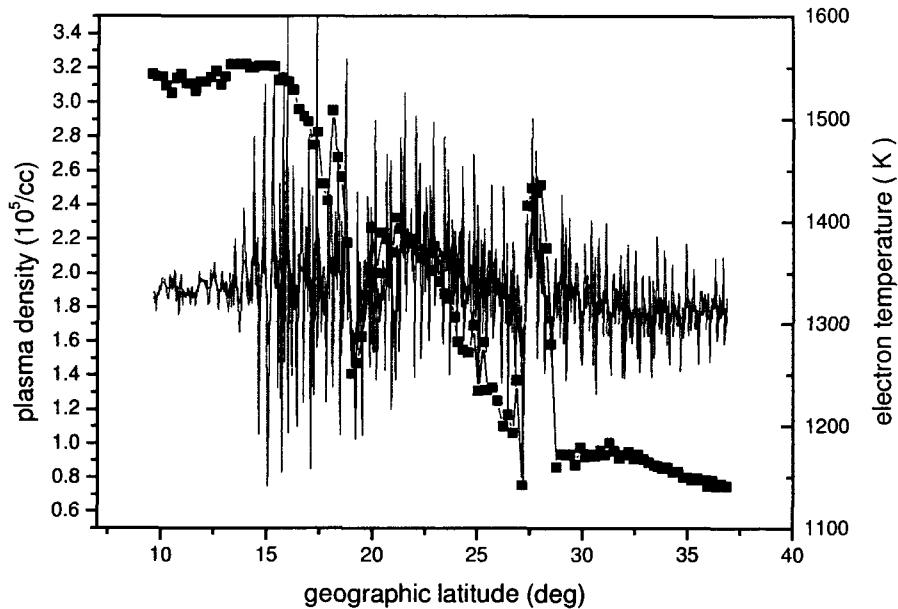


그림 9. 플라즈마 밀도(검은 점)와 전자 온도(가는 파선). 가는 파선 중심의 진한부분은 4초 간격으로 평균하여 노이즈를 없앤 전자 온도를 나타낸다. 위도 25도 부근의 밀도 급상승 지역에서 전자 온도 또한 100K 정도 증가하였음을 알 수가 있다.

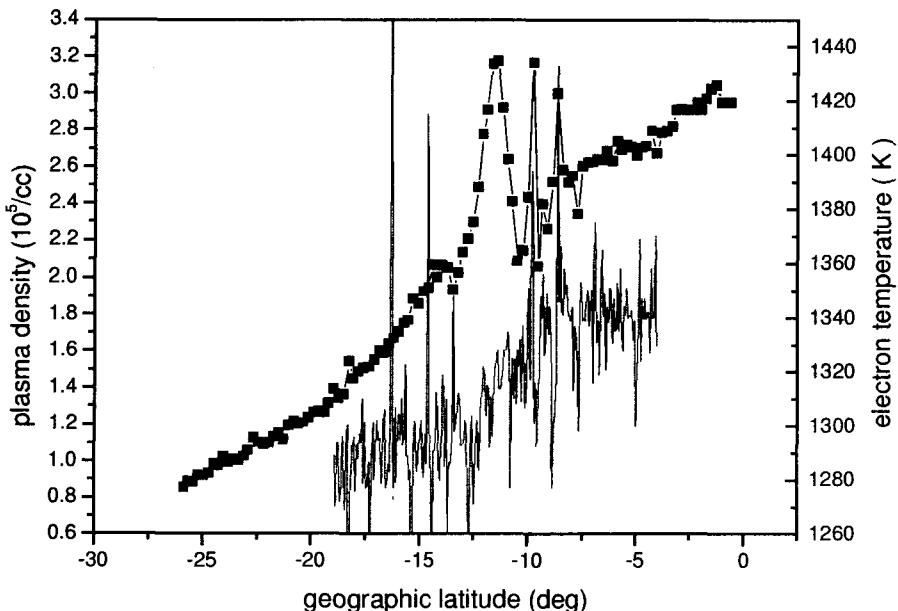


그림 10. 저위도 지역에서 발생하는 플라즈마 밀도 급상승 현상의 예. 플라즈마 밀도와 전자 온도 사이에 명확한 상관 관계가 존재하지 않으며, 전자 온도가 밀도 상승 지역의 존재에 영향을 받지 않고 있다.

자 온도 사이에 어떠한 명확한 상관 관계도 보이지 않으며, 밀도 급상승 현상 내에서 전자 온도는 아무런 변화를 겪지 않고 있음을 알 수가 있다.

위의 예들에서 볼 수 있듯이, 밀도 급상승 지역 내에서의 전자 온도 변화는 여러가지 다양한 경향을 나타내고 있는데, 때로는 전자밀도와 함께 상승하고, 때로는 감소하며, 밀도 변화에 아무런 영향을 받지 않는 경우도 있다. 이러한 각 사건들의 상대적 비율은

- (i) 밀도 급상승 구간 내에서 전자 온도가 감소하는 궤도수: 35회, 전체의 70%
- (ii) 밀도 급상승 구간 내에서 전자 온도가 증가하는 궤도수: 5회, 전체의 10%
- (iii) (i)과 (ii)가 모두 발견된 궤도수: 4회, 전체의 8%
- (iv) 플라즈마 밀도와 온도 사이에 특별한 상관 관계가 없는 궤도수: 6회, 전체의 12%

이다. (i)~(iv)에서 정리한 바와 같이 다수의 밀도 급상승 사건이 발생한 하나의 위성 궤도 내에서, 전자 온도가 증가와 감소의 두 가지 현상을 모두 나타내는 경우 또한 존재한다. 이 결과를 통하여 밀도 급상승 구간 내의 전자 온도는 대개의 경우에 수백 K 정도의 크기를 갖고 감소하며, 이 때 전자 온도와 플라즈마 밀도는 서로 반상관 관계(anti-correlation)를 갖는 것처럼 보인다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 아직까지 명확히 밝혀진 바가 없으나, 앞으로의 연구에서 주목할 만한 가치가 있다.

4. 결 론

다목적 실용위성 1호(KOMPSAT-I)의 SPS IMS가 저위도 이온층에서 관측한 플라즈마 밀도 급상승 현상의 특징에 대하여 기술하였다. 이 현상은 경도 180° 부근의 하와이 지역과 경도 300° 부근의 대서양 지역에서 빈번하게 발생함을 알 수가 있는데, 이 두 지역은 지구 자기장의 이상 변화가 있음이 알려져 있는 곳이다(Oyama et al. 1988). 따라서, 관측된 밀도 급상승 현상은 지자기 이상 또는 이와 연관된 고 에너지 입자의 유입과 밀접한 관련이 있다는 결론을 내릴 수 있다. 한편, 지자기 활동성의 지표인 Dst나 태양 활동성의 지표인 F10.7과는 뚜렷한 상관 관계를 보이지 않는 것으로 보아, 자기 폭풍 또는 태양 에너지의 변화에 의해 시작되는 현상은 아니라는 것을 알 수 있다. 밀도 상승 구간 내의 전자 온도 변화는 다양한 경향을 보이고 있지만, 대개의 경우 수백 K 정도 감소하는 것이 일반적이다. 이러한 현상들을 잘 이해하기 위하여 더욱 풍부한 자료수집 및 이론적인 접근이 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 국제공동연구(20016-134-01-2) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- Aarons, J. 1991, Radio Sci., 26, 1131
 Devasia, C. V., Jyoti, N., Subbarao, K. S. V., Viswanathan, K. S., Tiwari, D., & Sridharan, R. 2002, JASTP, 64, 1
 Hanson, W. B., & Urquhart, A. L. 1994, GRL, 21, 2051
 Huang, C. Y., Burke, W. J., Machuzak, J. S., Gentile, L. C., & Sultan, P. J. 2001, JGR, 106, 8131
 Hysell, D. L., Seyler, C. E., & Kelley, M. C. 1994, JGR, 99, 8841
 Hysell, D. L., & Shume, E. B. 2002, JGR, 107, 1269
 Jahn, J.-M., LaBelle, J., & Treumann, R. A. 1997, JASTP, 59, 439

- Kil, H., & Heelis, R. A. 1998, JGR, 103, 3969
Kim, Y. H., Hong, S. S., & Weinberg, J. L. 2002, JGR, 107, 1264
Lee, J.-J. 2002, Ph.D. Thesis, KAIST
McDaniel, R. D., & Hysell, D. L. 1997, JGR, 102, 22233
Mendillo, M., Meriwether, J., & Biondi, M. 2001, JGR 106, 3655
Oyama, K.-I., Schlegel, K., & Watanabe, S. 1988, PSS, 36, 553
Watanabe, S. 2002, private communication
Whalen, J. 2002, JGR, 107, 1029