

## KOMPSAT-1 SPS IMS에 관측된 적도 이온층 밀도 불균일 현상에 대한 연구

박재홍<sup>†</sup>, 이재진, 이은상, 민경욱  
한국과학기술원 물리학과

### STUDY ON EQUATORIAL BUBBLES DETECTED BY SPS IMS ONBOARD THE KOMPSAT-I

Jaehung Park<sup>†</sup>, Jaejin Lee, Ensang Lee, and Kyoung-Wook Min  
Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea  
E-mail : jhpark@space.kaist.ac.kr

(Received April 19, 2002; Accepted May 23, 2002)

#### 요 약

다목적 실용 위성 1호는 1999년에 발사되어 운용되고 있으며, 과학 탑재체로 우주과학센서(Space Physics Sensor)를 탑재하고 있다. 이중 SPS IMS는 2000년 6월부터 2001년 8월에 이르는 태양 활동 극대기 동안 지구 이온층에 관한 정보를 지상으로 전송하였다. 다목적 실용위성 1호가 적도 지역을 통과할 때 전자 밀도가 급격히 감소하는 플라즈마 밀도 불균일 현상(equatorial bubble)이 자주 관측되었다. SPS IMS가 운용된 기간 동안의 데이터를 통계적으로 분석한 결과, equatorial bubble 현상은 지구 자기장의 크기가 약한 대서양 지역에서 자주 일어났고, 또한 Kp 값이 낮을 때에 더욱 빈번하게 발생하였다. 이는 기존의 DMSP 위성을 통한 관측 결과 및 페루 지역의 라디오 관측 결과 등과 상당한 수준의 일치성을 보이고 있다. 밀도 불균일 지역 내의 전자 온도 변화는 전자 밀도 변화와 다양한 상관 관계를 나타낸다.

#### ABSTRACT

Space Physics Sensor onboard the KOMPSAT-1, which was launched at 1999, had transmitted ionospheric data during the solar maximum from June 2000 to August 2001. When the KOMPSAT-1 has passed the equatorial region, equatorial bubbles, in which the electron density abruptly decreases, had frequently been detected. Statistical analysis of the data obtained during the entire operational period shows equatorial bubbles frequently occur across the Atlantic region where the geomagnetic field strength is weak. Also, equatorial bubbles occur more frequently for lower Kp index. The results are in good agreement with the previous observations by DMSP satellites and radio experiments at the Peruvian sector. The correlation between electron density and the electron temperature shows various behaviors from event to event.

*Keywords:* equatorial bubble, topside ionosphere

---

<sup>†</sup>corresponding author

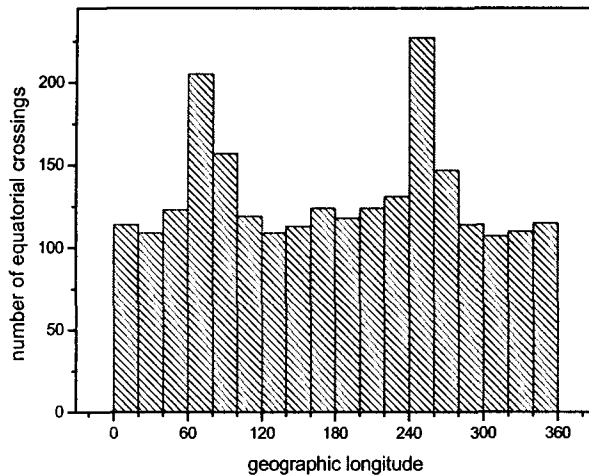


그림 1. 운용기간 동안 다목적 실용위성 1호가 적도를 통과한 회수를 각 경도 구간별로 합산한 그래프.

## 1. 서 론

적도 지역 이온층에는 간헐적으로 플라즈마 밀도가 불균일한 영역이 나타나며, 그 범위는 수 미터에서 수백 킬로미터에 이르기까지 다양하다(Kil & Heelis 1998). 이처럼 좁은 지역에서 일어나는 플라즈마의 밀도 불균일 현상은 그 특징에 따라 여러가지로 분류될 수 있지만, 대체로 equatorial bubble, 또는 equatorial spread-F라 통칭된다. 이러한 불균일 영역은 보통 해가 진 후 발생하여 수 시간 동안 지속되곤 하는데, 이것의 존재는 적도 지역 이온층과 연관된 통신에 장애를 일으키게 된다. 이러한 equatorial bubble은 이온층의 F층 하부에 존재하는 중력파(gravity wave)에 의해 생긴 초기 교란이 일반화 레일리-테일러 불안정성(generalized Rayleigh-Taylor instability)에 의해 증폭되어 발생된다고 알려져 있다(Ott 1978, Kelley et al. 1981). 태양 활동이나 Kp index(Huang et al. 2001, Whalen 2002), 계절(Aarons 1993), 중성풍(Mendillo et al. 2001, Devasia et al. 2002), 경도대(Aarons 1993) 등 관련 인자에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으나, equatorial bubble의 발생을 예보하는 것은 아직 담보 수준에 그치고 있다. Bubble은 대개 태양 활동 극대기에, 경도 방향의 중성풍이 없을수록, Kp index가 낮을수록 빈번하게 발생하는 것으로 알려져 있다. Bubble 내부에서의 전자 온도 변화는 상대적으로 주목 대상이 되지 못하여 왔다. Kutiev et al.(1977), Brace et al.(1982), Oyama et al.(1988) 등이 bubble내의 전자 온도 변화를 연구한 바 있으나, 명확한 상관 관계를 밝혀 내지 못한 바 있다. 이 논문에서는 다목적 실용 위성 1호(KOMPSAT-I)의 탑재체 중 하나인 우주과학센서(Space Physics Sensor; SPS)를 통해 관측된 equatorial bubble들의 통계적 특성에 대해 알아본다. 특히, equatorial bubble 발생의 지리적 분포와 계절과 자기 활동에 따른 분포를 알아본다. 또한, equatorial bubble 내부의 전자 온도와 밀도 구조에 대해서도 알아본다.

## 2. 관 측

다목적 실용 위성 1호(KOMPSAT-1)는 1999년 12월 21일 발사되었으며, 과학 탑재체로 SPS가 탑재되었다. SPS는 고에너지 입자를 관측하기 위한 고에너지 입자 검출기(HEPD)와 이온층의 열

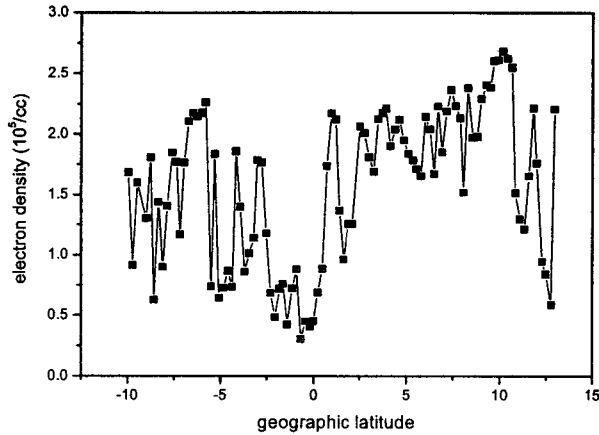


그림 2. LP에 의해 관측된 전자 밀도의 위도에 따른 변화. equatorial bubble의 일례를 보여준다.

전자를 관측하기 위한 이온층 측정 센서(IMS)로 구성되었다. IMS는 원통형 랑뮈어 탐침(Langmuir Probe; LP)과 전자 온도 측정기(Electron Temperature Sensor; ETS)로 구성된다. IMS는 이온층 플라즈마의 파악에 기본이 되는 전자 밀도, 전자 온도, 부동 전위에 관한 정보를 동시에 얻을 수 있다. 다목적 실용 위성 1호는 고도 685 km의 태양 동기 궤도를 돌면서 일정한 지방시(Local Time)에서 상부 이온층 관측을 수행하였다(Lee 2002). SPS IMS는 2000년 6월 28일부터 데이터를 지구에 전송하기 시작하여, 2001년 8월 1일까지 1년이 조금 넘는 운용 기간동안 지구 이온층 관측 데이터를 전송하였다. 그림 1은 SPS IMS의 전체 운용 기간 동안 다목적 실용위성 1호가 자기 적도를 통과한 총 회수를 통과 당시의 경도에 따라서 분류한 그래프이다.

### 3. 결 과

그림 2는 전형적인 equatorial bubble 현상의 한 예이다. 이의 그림에서 볼 수 있듯, 이러한 현상은 비교적 좁은 영역에서 급격한 전자 밀도의 변화를 나타낸다. 이러한 equatorial bubble 발생을 통계적으로 분석하기 위하여 우리는 Huang et al.(2001)이 자신의 논문에서 밝힌 방식을 채택하였다. 즉, 수 km에서 수백 km의 scale length를 갖는 플라즈마 밀도 감소 영역을 bubble로 구분하며, 위성이 한 궤도상에서 여러 개의 bubble을 관측했을 경우에도 그것을 하나의 bubble 발생으로 구분하였다. 또한, 자기 위도  $\pm 15$ 도 부근의 전자 밀도가 자기 적도 지역의 전자 밀도에 비해 크게 증가하는 EIA(Equatorial Ionization Anomaly) 현상이 발생하기도 하는데, 이런 현상은 bubble로 취급하지 않았으며, 밀도 변화의 폭이 주변 플라즈마 밀도의 0.3배이하인 작은 사건들도 무시하였다.

#### 3.1 계절/경도에 따른 bubble의 발생 빈도

그림 3은 각 계절(춘분, 하지, 추분, 동지)별로 bubble이 발생하는 빈도를 경도 구역에 따라 표시한 그래프이다. 즉, 해당 계절과 경도 구역에서 bubble이 발생한 궤도의 개수를 그 기간과 구역에서의 총 궤도수로 나눠준 값을 말한다. 그림에서 춘,추분점 부근일 때 bubble은 주로 대서양 지역과 아프리카 지역에서만 발생하고 있으며, 태평양 연안에서는 거의 발생하지 않는다. 하지점 부근(5-7월)일 때 bubble 발생률은 경도 180도 부근에서 작은 극대값을 갖는다. 또한 동지점 부근(11-1월)일 때

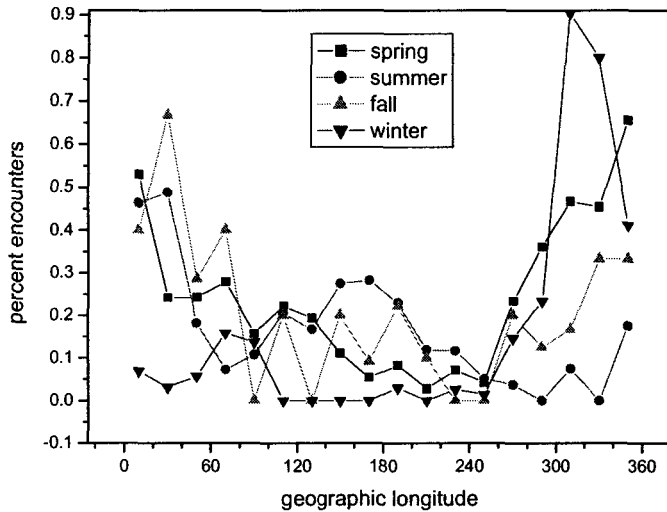


그림 3. 계절과 경도에 따른 bubble의 발생 빈도. 사각형은 봄, 원은 여름, 정삼각형은 가을, 역삼각형은 겨울에, 해당 경도 구간 내에서 bubble이 발생한 통계적 확률을 나타낸다.

의 bubble의 발생률은 경도 300도 부근에서 크게 증가하는 경향을 보이며, 태평양 연안에서의 발생 빈도는 0에 접근한다. 추분점 부근(8-10월)의 그래프에는 20도 가량의 주기로 빠른 요동 성분이 실려 있으며, 기존의 연구 결과에서는 볼수 없었던 것이다. 이는 해당 시기에 수집된 데이터의 양이 상대적으로 적기 때문에 나타난 통계적 허상으로 보이며, 이를 제외한 전체적 분포는 역시 대서양 지역에서 극대를 이루고 있다. 이상의 결과는 각 계절별로 Huang et al.(2001)의 DMSP 위성 연구 결과와 상당한 일치를 보이고 있다. 그림 4는 전체 운용 기간 동안 경도에 따른 bubble의 발생 빈도이다. 대체적으로 bubble은 대서양과 아프리카 지역에서 발생 빈도가 높고, 태평양 연안에서는 그 빈도가 매우 낮게 나타난다. 이는 두 지역의 자기장이 상이함에 따라 일어나는 것으로, 태평양 지역의 큰 자기장(~ 0.34 G)이 대서양 지역의 작은 자기장(~ 0.25 G)에 비해 레일리-테일러 불안정성의 발생을 더욱 억제하는 효과를 갖기 때문으로 알려져 있다(Huang et al. 2001, Tsunoda 1985).

### 3.2 Kp index에 따른 발생 확률

그림 5는 각 Kp index에 해당하는 SPS IMS의 적도 지역 통과 회수와 bubble을 관측한 궤도의 회수를 그린 그래프이다. 이 두 그래프를 이용하여, 각 Kp 값에 해당하는 bubble의 발생 확률을 구할 수가 있는데, 이는 그림 6에 나타나 있다. 그림 6을 보면 Kp ≤ 5인 구간에서는 bubble의 발생 빈도가 Kp 값의 증가에 대해 단조 감소하는 경향을 볼 수 있다. 즉, equatorial bubble은 자기 활동이 낮을 때 더 잘 발생한다고 볼 수 있다. 이는 위성 관측을 통한 이전의 연구 결과와 매우 잘 일치함은 물론, 태양 활동 극대기에 페루 지역에서의 라디오 관측을 통한 결과와도 거의 일치한다(Huang et al. 2001, Whalen 2002). Kp > 5를 넘는 경우에 나타나는 불규칙적인 증가는 그림 5(a)에서 보여진 것처럼 이런 상태가 나타나는 경우가 적기 때문에 발생하는 통계적 허상으로 판단되어 제외하였다.

### 3.3 Equatorial bubble 내에서의 전자 온도 변화

Equatorial bubble 내에서의 전자 온도 변화에 대한 연구 실적은 그 동안 매우 저조하였다. Equatorial bubble

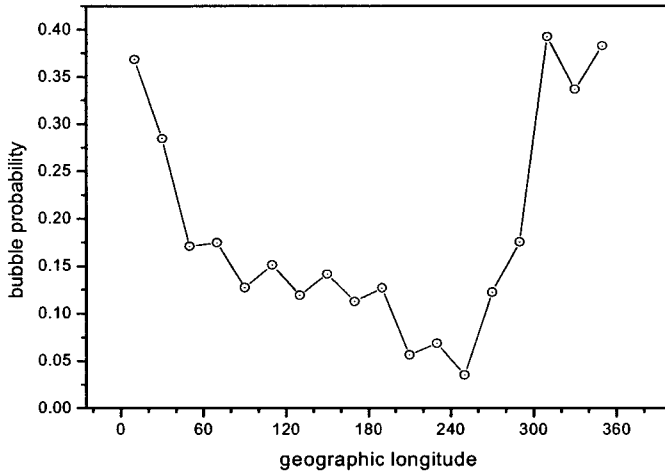


그림 4. 계절에 관계 없이 각 경도구간에서 bubble이 발생할 통계적 확률.

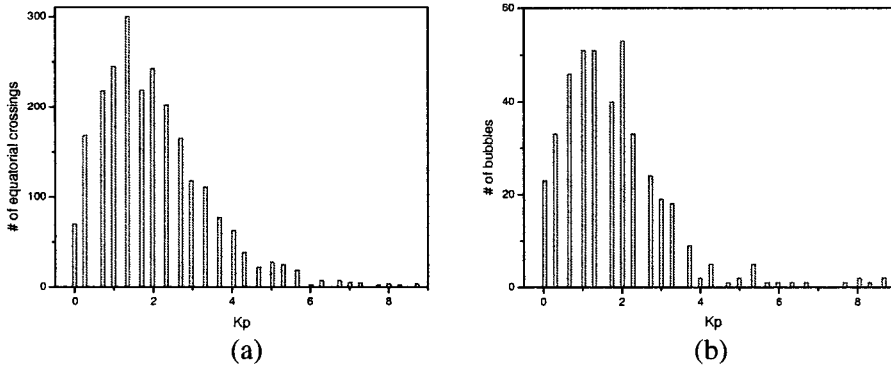


그림 5. 각 Kp index에 해당하는 시각에 총 적도 통과 궤도 수(a)와 bubble이 관측된 궤도 수(b).

torial bubble에서의 플라즈마 밀도 변화와 함께 전자 온도의 변화를 함께 측정하려는 노력은 1980년대 일본의 Hinotori 위성 등에 의해 시도 되었으나, 아직까지 밀도-온도 변화 사이의 명확한 관계를 밝혀줄 만한 관측은 이루어지지 않았다(Oyama et al. 1988). SPS IMS는 전자의 밀도를 알 수 있는 랑뮈어 탐침 이외에 전자 온도 탐침(ETS)을 탑재하여, bubble 내에서의 전자 온도 해석의 가능성을 크게 높였다. 관측 결과, bubble 내에서의 전자 온도는 bubble 바깥의 전자 온도에 비해 높거나 낮은 경우 모두 나타나고, 바깥과 같은 경우도 보인다. 그림 7은 bubble 내의 전자 밀도와 전자 온도 사이의 관계가 일정 수준의 상관(correlation)을 보이고 있는 예를 나타낸 것이다.

전자 밀도가 급격하게 감소하는 곳과 전자 온도가 감소하는 곳이 대략 일치하며, 밀도 고갈 영역(depletion region)에서의 전자 온도는 그 주변 지역에 비해 수백 K 가량 낮다.

그림 8은 bubble 내의 전자 밀도와 전자 온도가 서로 반상관(anti-correlation)을 보이는 예이다. 그림 7과는 반대로 밀도 고갈 영역에서 전자 온도가 주위보다 수백 K 가량 상승하고 있다. 현재 이러한 온도 역전 현상은 South Atlantic Anomaly(SAA) 지역에 국한되어 나타나는 것으로 알려져 있다(Oyama et al. 1988). 그림 9는 전자 온도와 밀도 사이에 전혀 상관 관계가 보이지 않는 경우이다.

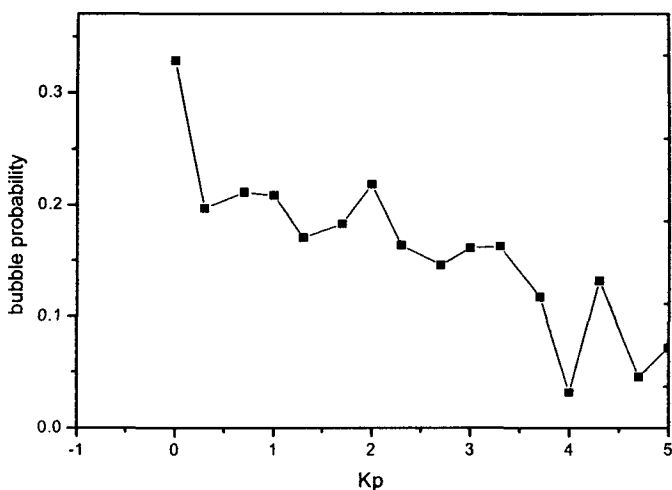


그림 6. 각 Kp index에 따른 bubble의 통계적 발생 확률.

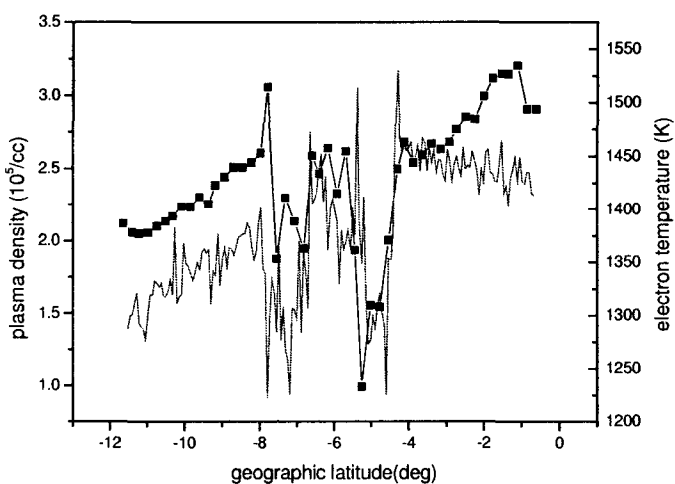


그림 7. 위도에 따른 전자 밀도(LP)와 전자 온도(ETS)의 변화. 사각형 기호를 포함하는 실선이 전자 밀도를 나타내고, 기호가 없는 실선이 전자 온도를 나타낸다. bubble 내에서 전자 밀도와 전자 온도가 상관 관계를 보인다.

SPS IMS의 관측 결과에는 이러한 경우 또한 상당수가 존재하고 있다. SPS IMS의 관측에서 위 세 경우 모두 나타나는데, 이러한 경향성의 지역에 따른 의존성이나 태양 활동에 따른 의존성, 또는 계절에 따른 의존성도 명확히 나타나지 않는다. 따라서, 이러한 각각의 경우가 나타나는 이유는 아직 정확히 밝혀지지 않고 있으며, 향후 이에 대한 연구가 추가되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

다목적 실용 위성 1호에 탑재된 SPS IMS를 이용하여 적도 지역 이온층의 플라즈마 밀도 이

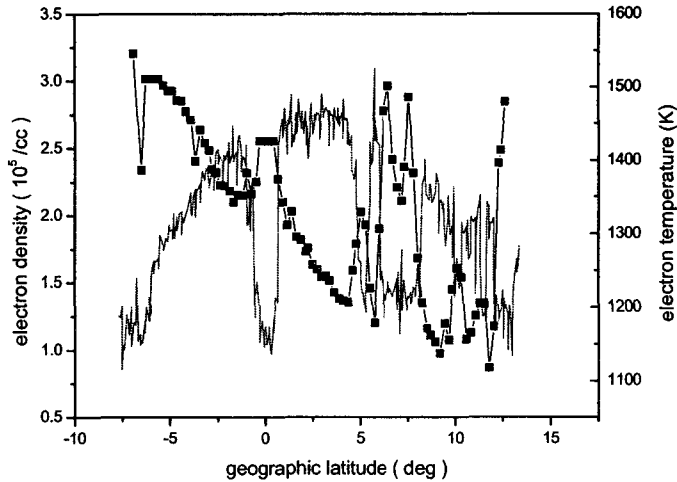


그림 8. 위도에 따른 전자 밀도와 전자 온도의 분포. 사각형 기호를 포함하는 실선이 전자 밀도를 나타내고, 기호가 없는 실선이 전자 온도를 나타낸다. 버블 내의 전자 밀도와 전자 온도가 반상관 관계를 보인다.

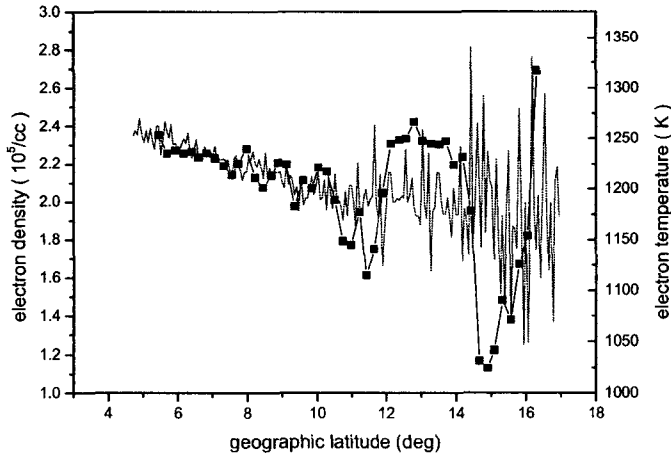


그림 9. 위도에 따른 전자 밀도와 전자 온도의 분포. 사각형 기호를 포함하는 실선이 전자 밀도를 나타내고, 기호가 없는 실선이 전자 온도를 나타낸다. 전자 밀도와 전자 온도 사이에 상관 관계가 보이지 않는다.

상(equatorial bubble)의 통계적 분포에 대하여 연구하였다. Bubble의 경도와 계절에 따른 분포는 기존의 관측 결과와 일치 보이고 있으며, 대체적으로 자기장이 약한 대서양 연안에서 많은 발생 확률을 보이고 있다. Kp index에 따른 bubble의 발생 확률 분포 또한 기존의 연구 결과들과 일치하고 있으며, Kp 값이 높아짐에 따라 bubble의 발생 확률은 낮아지고 있다. Bubble 내에서 전자 온도는 그간 많은 연구가 이루어 지지 않았으나, 주위보다 높은 경우와 낮은 경우, 또 비슷한 경우 모두 나타나는 것으로 알려져 있고, SPS ETS의 결과도 동일하였다. 이러한 경우들의 지역이나 계절, 태양 활동에 따른 의존성이 명확하지 않아 각각의 경향성이 나타나는 이유를 밝히는 데 어려움이 있다. 이에 대해서는 향후 지속적인 연구가 필요하다고 보여진다.

참고문헌

- Aarons, J. 1993, *Space Sci. Rev.*, 63, 209
- Brace, L. H., Theis, R. F., & Hoegy, W. R. 1982, *GRL*, 9, 989
- Devasia, C. V., Jyoti, N., Subbarao, K. S. V., Viswanathan K. S., Tiwari, D., & Sridharan, R. 2002, *JASTP*, 64, 1
- Huang, C. Y., Burke, W. J., Machuzak, J. S., Gentile, L. C., & Sultan, P. J. 2001, *JGR*, 106, 8131
- Kelley, M. C., Larsen, M. F., LaHoz, C., & McClure, J. P. 1981, *JGR*, 86, 9087
- Kil, H., & Heelis, R. A. 1998, *JGR*, 103, 3969
- Kutiev, I., Dachev, T., & Serafimov, K. 1977, *Space Res.*, 18, 269
- Lee, J. 2002, Ph.D. Thesis, KAIST
- Mendillo, M., Meriwether, J., & Biondi, M. 2001, *JGR*, 106, 3655
- Ott, E. 1978, *JGR*, 83, 2066
- Oyama, K.-I., Schlegel, K., & Watanabe S. 1988, *Planet. Space Sci.*, 36, 553
- Tsunoda, R. T. 1985, *JGR*, 90, 447
- Whalen, J. 2002, *JGR*, 107, 1029