J. Astron. Space Sci. 19(1), 75–88 (2002)

SONDRESTROM 비간섭 산란 레이더 자료를 이용한 극지방 전리층의 기후학적 특성 연구

곽영실[1†], 안병호[2]
[1]경북대학교 천문대기과학과
[2]경북대학교 지구과학교육과

CLIMATOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE POLAR IONOSPHERE BASED ON THE SONDRESTROM INCOHERENT SCATTER RADAR MEASUREMENTS

Young-Sil Kwak[1†], Byung-Ho Ahn[2]
[1]Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
[2]Department of Earth Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
E-mail: ys-kwak@hanmail.net, bhahn@knu.ac.kr

(Received February 9, 2002; Accepted February 20, 2002)

요 약

전리층의 전기 전도도와 전기장을 구함으로써 극지방 전리층의 기후학적 특성을 살펴보았다. 이를 위해, 총 109일간의 Sondrestrom 비간섭 산란 레이더 자료를 이용하였다. 전기 전도도와 전기장을 이용하여 전리층 전류 분포를 추정하였고, 구해진 전리층 전류 밀도와 그로 인해 유발되는 지상 지자기 변화를 비교하였다. 또한 지상 지자기 변화(특히, D 성분)에 대한 연자기력선 전류의 효과도 검토되었다. Sondrestrom 상공 전리층에 대한 몇 가지 흥미로운 기후학적 특성을 본 연구로부터 알 수 있었다: (1) 주간의 전기 전도도 분포는 주로 태양 EUV 복사에 의한 것이며, 야간에는 미약하다. (2) 극관 영역 전리층의 전기 전도도 분포는, 주간에는 태양 EUV 복사에 의한 분포를 보이는 반면, 야간에는 Hall 및 Pedersen 전기 전도도의 시간 평균이 각각 1.6 및 1.2 siemen으로 아주 낮다. (3) 남북 성분 전기장의 최대치가 낮 영역에 나타나는 경향이 있다. 동서 성분 전기장은 Chatanika에 비해 강하다. (4) 동서 성분 전류는 낮 영역에서 강하게 흐른다. 정오 바로 전에 강한 남향 전류가 흐른다. (5) 오로라제트전류와 동시에 관측된 지상 지자기 변화(ΔH) 사이에 높은 상관관계를 나타낸다. 하지만 무한판상을 가정한 전류가 크게 과소평가된다. 또한 ΔH와 J_E의 상관관계가 ΔD와 J_N의 관계보다 더 높게 나타나며, 이것은 연자기력선 전류가 ΔD에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

ABSTRACT

The climatological characteristics of the polar ionosphere is examined in terms of the ionospheric conductance and electric field. For this purpose, 109 days of measurements from the Sondrestrom incoherent scatter radar are utilized. By combining these two quantities, it is possible to deduce the overhead ionospheric current distributions. The ionospheric current density thus obtained is compared with the corresponding ground magnetic disturbance. Also examined is the effect of the field-aligned current on the ground magnetic disturbance, particularly on the D component. Several

†corresponding author

interesting climatological characteristics about the ionosphere over the Sondrestrom are apparent from this study: (1) The conductance distribution is mainly due to solar EUV radiation during day-time. On the other hand, the conductance distribution during the night-time is very low. (2) The conductance distribution over the polar cap region during the day-time is controlled mostly by the solar EUV radiation, while it is extremely low during night-time with the Hall and Pedersen conductances being 1.6 and 1.2 siemen, respectively. (3) The region of the maximum N-S electric field tend to locate in the dayside sector. The E-W component of the electric field is stronger than that over Chatanika. (4) The E-W auroral ionospheric current(J_E) is more important in the sunlit hemisphere than the night hemisphere. And a strong southward current is noted in the prenoon sector. (5) There is a significant correlation between the overhead ionospheric current and the simultaneously observed ground magnetic disturbance. However, the assumption for the infinite sheet current approximation is far from realistic, underestimating the current density. And the correlation between ΔH and J_E is higher than the one between ΔD and J_N, indicating that field-aligned current affects significantly ΔD.

Keywords: ionospheric conductance, electric field, current density, ground magnetic disturbance

1. 서 론

전리층의 전기 전도도와 전기장을 관찰함으로써 전리층 전류를 직접 추정하는 것이 가능하다. Brekke et al.(1974)은 Chatanika 비간섭 산란 레이더로부터 구한 전기 전도도와 전기장을 이용해 추정된 전류와 레이더에 인접한(16 km) College 지자기 관측소에서 측정된 지자기 변화를 비교하였다. 그 결과, 지자기의 H 성분은 추정된 동서 성분의 전류를 비교적 잘 반영하는 반면, D 성분은 남북 방향의 전류와 잘 일치하지 않으며, 그것은 연자기력선 전류의 존재 없이는 설명이 되지 않는다고 밝혔다. Chatanika 레이더 자료를 이용한 비슷한 분석이 Kamide & Brekke(1975)에 의해 수행되었다. 그들은 관측에 의해 추정된 전류밀도에 대해서 무한 판상 모델의 전류 밀도가 거의 항상 2배 이상 과소 평가된다고 제시하였고, 과소평가의 원인으로 오로라제트전류의 위도상 넓이, 오로라제트전류 중심으로부터의 거리, 전류 밀도의 위도에 따른 변화 및 연자기력선 전류의 효과를 지적하였다. 더 나아가 Kamide et al.(1976)은 남북 방향 전류와 D 성분 사이의 불일치는 오로라타원체의 극쪽과 적도쪽에서 다른 강도를 나타내는 연자기력선을 도입함으로써 제거할 수 있다는 결론을 내렸다. Araki et al.(1989)은 EISCAT 레이더 자료를 분석하여, 지상 지자기 변화는 주로 Hall 전류에 의해 야기되며, Pedersen 전류의 영향은 Hall 전류의 30% 미만이라는 것을 밝혔다. 한편, 여러 연구를 통하여, 지상에서 관측되는 지자기 변화에는 전리층 전류 이외에 지구 내부의 유도 전류 효과 또한 포함된다는 사실이 보고되었다(e.g. Chapman & Bartels 1940, Brekke et al. 1974, Kamide & Brekke 1975). Popov et al.(2001)은 지상 지자기 변화를 유발시키는 이러한 두 가지 요인을 분리하려는 시도를 한 바 있다. Ahn et al.(1999)은 Chatanika 레이더에 의해 관측된 52일간의 전리층 전기 전도도와 전기

장의 일변화를 조사해서 오로라 영역에 관한 기후학적 연구를 수행하였다. 그들은 동향 오로라제트전류와 관련된 오후 영역의 Hall 전기 전도도 분포는 주로 태양에 의해 결정되는 반면, 주로 서향 오로라제트전류와 관련된 자정 이후의 Hall 전기 전도도는 하강전자에 의해 결정됨으로써 동향 및 서향 제트전류가 다른 물리적 과정에 의해 지배됨을 밝혔다.

그런데 Chatanika와 EISCAT 레이더를 이용한 연구들은 극지방 전리층 전역이 아니라 오로지 오로라 영역 전리층에 대해서만 국한된다. 다행히 1983년부터 Greenland의 Sondre Stromfjord에서 운영되어 오고 있는 Sondrestrom 레이더는, 지리적으로는 Chatanika 및 EISCAT 레이더와 비슷한 위도에 위치하지만, 지자기적으로는 훨씬 고위도에 위치해서 오로라 활동도에 따라 오로라 영역뿐만 아니라 극관 영역에도 위치하게 된다. 따라서 극관 영역까지도 포함한 극지방 전리층 전역에 대한 연구가 가능해졌으며, 더욱이 레이더가 오랜 기간 운용되었기 때문에 그 동안 축적된 자료가 극지방 전리층의 기후학적 양상을 이끌어내는데 충분하다.

본 연구에서는 Sondrestrom UHF 비간섭 산란 레이더 자료를 이용하여 Sondrestrom 상공의 전리층 전기 전도도와 전기장을 구하고, 오로라 영역과 극관 영역으로 구분하여 기후학적 특성을 살펴보고자 한다. 그리고 전기 전도도와 전기장을 결합하여 전류 분포를 추정하고 상기 레이더와 동일 지점에 설치된 자력계에 의해 동시에 관측된 지상 지자기 변화와의 관련성을 조사하고자 한다.

2. 자 료

극지방 전리층의 전기 전도도와 전기장을 구하기 위하여, Greenland 서부 해안가 Sondre stromfjord(경·위도: 50°.9W, 66°.9N, 지자기 경·위도: 42°.40W, 74°.36N)에 설치된 Sondrestrom UHF 비간섭 산란 레이더에 의해 1983년부터 1999년까지 관측된 총 109일의 자료를 사용하였다. 분석에 직접 사용된 레이더 자료는 후방 산란된 전력으로부터 구해진 고도에 따른 전자 수밀도, 수신된 신호의 도플러 편이로부터 구해진 이온 속도, 그리고 수신된 신호의 스펙트럼 모양으로부터 결정되는 이온 성분(O^+, O_2^+, N_O^+), 전자 및 이온의 온도이다.

상기 레이더의 수신 진동수는 1290 MHz, 수신 첨두 전력(peak power)은 2.5 ~ 4 MW, 안테나 직경은 32 m 그리고 안테나 빔 폭은 0.6°이다(Kelly et al. 1995). 전형적인 안테나 모드는, 1983년부터 1989년까지는 자오선을 따라 빔을 발사하고 수신하는 자오선 주사 모드(meridional scan mode)이고, 1990년부터 1999년까지는 방위각을 따라 회전하면서 한 개의 빔은 자기력선과 나란한 방향(방위각 141°, 고도 80°)으로 그리고 나머지 두 개의 빔은 자기력선과 수직인 방향(방위각 21°, 고도 70°/ 방위각 261°, 고도 70°)으로 발사 또는 수신한다. 시간 분해능은 1983년부터 1989년까지는 4 ~ 5분이고, 1990년부터 1999년까지는 15 ~ 16분이다. 고도 분해능은 고도 200 km 아래는 6 km이고, 200 km 위로는 48 km이다. 본 연구에 사용된 총 109일은 봄(2, 3, 4월)에 14일, 여름(5, 6, 7월)에 35일, 가을(8, 9, 10월)에 32일, 그리고 겨울(11, 12, 1월)에 28일간 관측되었다. 그리고 관측기간의 평균 Kp지수는 2+ ~ 3−이다.

고도에 따른 중성대기(N_2, O_2, O)의 밀도, 온도 및 중성풍 속도에 대한 자료는 MSISE-90 중성대기 모델(Hedin 1991)을 사용했고, 주자기장(B)에 대한 정보는 IGRF-1995 국제 표준 자기장 모델(Barton 1997)의 값을 이용하였다. 전기 전도도 추정을 위해서 상기 자료들 외에도 태양의 10.7 cm 전파 복사량인 Sa 값과 Ap 지수 값을 사용하였다. 추정된 전리층 전류와의 관련성 조사에 이용된 지

상 지자기 자료는 상기 레이더와 동일 지점에 위치하며 덴마크의 기상청이 운영하는 Sondrestrom 지자기 관측소에서 측정한 지상 지자기 변화 기록이다. 지상 지자기 변화 자료가 레이더 자료와 동일한 시간 분해능을 가지도록 하기 위해서, 레이더 자료의 시간 분해능에 따라 시간 평균을 취하였다.

3. 오로라 영역 전리층의 기후학적 특성

3.1. 전기 전도도의 분포

Sondrestrom 레이더에서 측정한 109일 간의 관측치로부터 오로라 영역 상공의 전리층 전기 전도도의 UT(또는 자기지방시, MLT)에 따른 특성을 조사하였다. 여기서, 오로라 영역은 아침시간대에는 $\Delta H < 0$이고 $E_N < 0$인 영역, 그리고 저녁시간대에는 $\Delta H > 0$ 이고 $E_N > 0$인 영역으로 제한하였다.

그림 1(a)는 Hall 전기 전도도의 일변화를 나타낸 것이다. 그림에서 각 점은 레이더 자료의 시간 분해능에 따라 구한 고도에 따른 전기 전도도를 90 km에서 200 km까지 고도 적분한 값이다. 여기에서, 전리층 전기 전도도는 두 가지 원인에 의해 좌우됨을 볼 수 있다. 하나는 지자기 정오 근처에서 최대치를 보이며 완만하게 변하는 태양 EUV 복사와 관련 있는 분포이고, 다른 하나는 밤 영역에서 큰 값을 보이는 오로라 입자의 하강과 관련 있는 분포이다. 시간 평균치를 나타낸 그림 1(b)를 보면, 태양 EUV 복사와 관련된 낮 영역의 Hall 전기 전도도는 최고 약 8 siemen으로 Chatanika 레이더 관측(Ahn et al. 1999)과 비슷하다. 반면 하강 오로라 입자와 관련된 밤 영역의 전기 전도도는 약 3~4 siemen으로 현저히 미약하다. 이는 Sondrestrom 레이더가 지리적으로는 Chatanika 레이더(경.위도: 147°.45W, 65°.10N, 지자기 경.위도: 105°.00W, 64°.75N)와 비슷한 위도에 위치한 반면 지자기적으로는 훨씬 고위도에 위치해서, 특히 밤 영역은 오로라 영역이라 하더라도 오로라 활동이 약할 때 극쪽으로 수축한 오로라 타원체 아래에 위치함을 의미한다. 이는 오로라 활동이 미약할 때 수축된 오로라 타원체 상에는 오로라 입자의 평균 에너지 및 에너지 속이 낮다는 DMSP 인공위성을 통한 Hardy et al.(1985, 1987)의 관측 결과와도 잘 일치한다.

그림 1(c)(d)는 Pedersen 전기 전도도의 일변화 및 시간 평균된 값을 각각 나타낸 것이다. 주간 태양 EUV 복사에 의한 Pedersen 전기 전도도의 시간 평균치는 최고 약 5.6 siemen으로, Hall 전기 전도도의 약 0.7배 정도이며, 시간에 따른 변화 양상은 비슷함을 볼 수 있다.

극관 영역의 전기 전도도 일변화 분포는 그림 2와 같다. 여기서, 극관 영역은 오로라 영역과 반대로, 저녁시간대에는 $\Delta H < 0$ 이고 $E_N > 0$인 영역, 그리고 아침시간대에는 $\Delta H > 0$ 이고 $E_N < 0$인 영역으로 정의하였다. 관측 빈도로 보아, Sondrestrom이 극관 영역에 들어가는 경우가 오로라 영역보다 극히 적다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 밤 영역에 속한 빈도가 낮 영역의 약 2배 정도로, Sondrestrom은 야간에 극관 영역에 위치할 가능성이 높음을 알 수 있다.

극관 영역의 전리층 전기 전도도 분포에서 가장 뚜렷한 특징은 낮 영역에는 오로라 영역과 거의 동일한 값의 태양 EUV 복사에 의한 높은 값들이 분포하는 반면, 밤 영역(특히 자정 부근)에는 Hall 및 Pedersen 전기 전도도가 각각 평균 약 1.6 및 1.2 siemen으로 오로라 영역에 비해 지극히 낮다는 것이다. 이는 오로라 영역과는 달리 극관 영역에는 오로라 입자의 유입이 적거나 하강하는 오로라 입자의 에너지가 낮음을 의미한다.

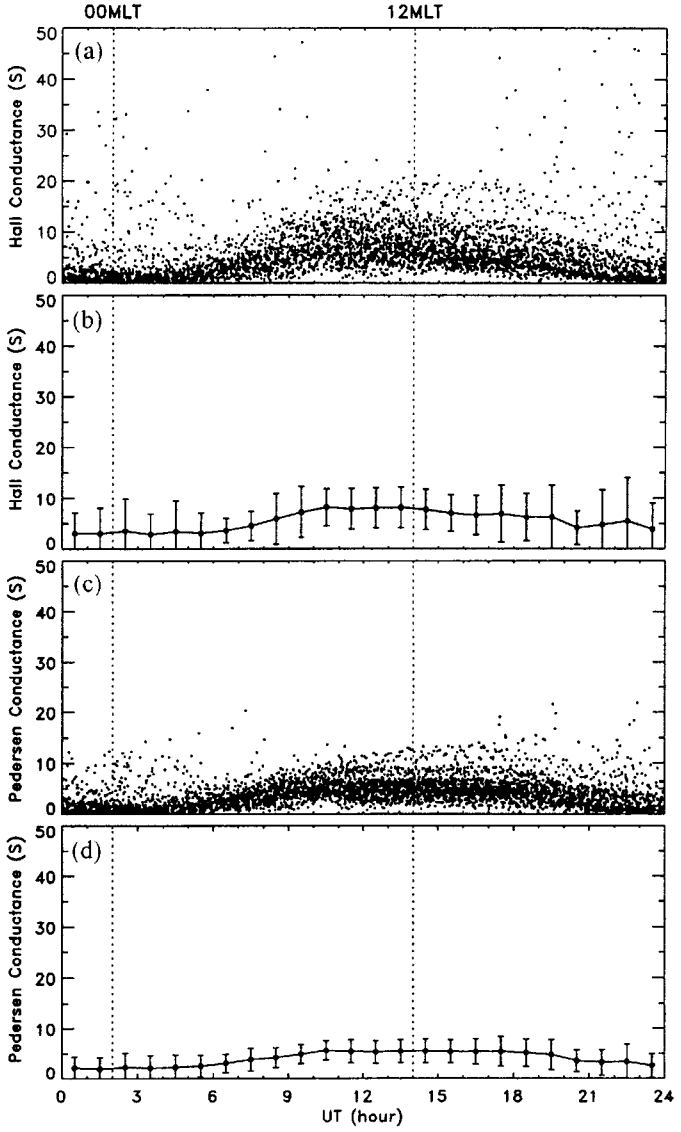

그림 1. Sondrestrom 레이더로 추정한 오로라 영역 상공의 전기 전도도 분포. (a) 고도적분된 Hall 전기 전도도의 일변화 분포, (b) Hall 전기 전도도의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차, (c) 고도적분된 Pedersen 전기 전도도의 일변화 분포, (d) Pedersen 전기 전도도의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차.

3.2. 전기장의 분포

그림 3은 그림 1과 동일한 기간에 Sondrestrom에서 측정한 전기장 분포이다. 그림 3(a)는 남북 성분으로서, 그림에서 각 점은 전기 전도도와 동일한 레이더 시간 분해능에 따라 측정된 전리층의 전기장이다. 여기서, 북향 성분은 양의 값으로 그리고 남향 성분은 음의 값으로 나타내었다. 자정 근방에서의 전기장 분포의 특징은 남북 성분이 같은 빈도로 나타난다는 점이다. 이것은 자정 부근에

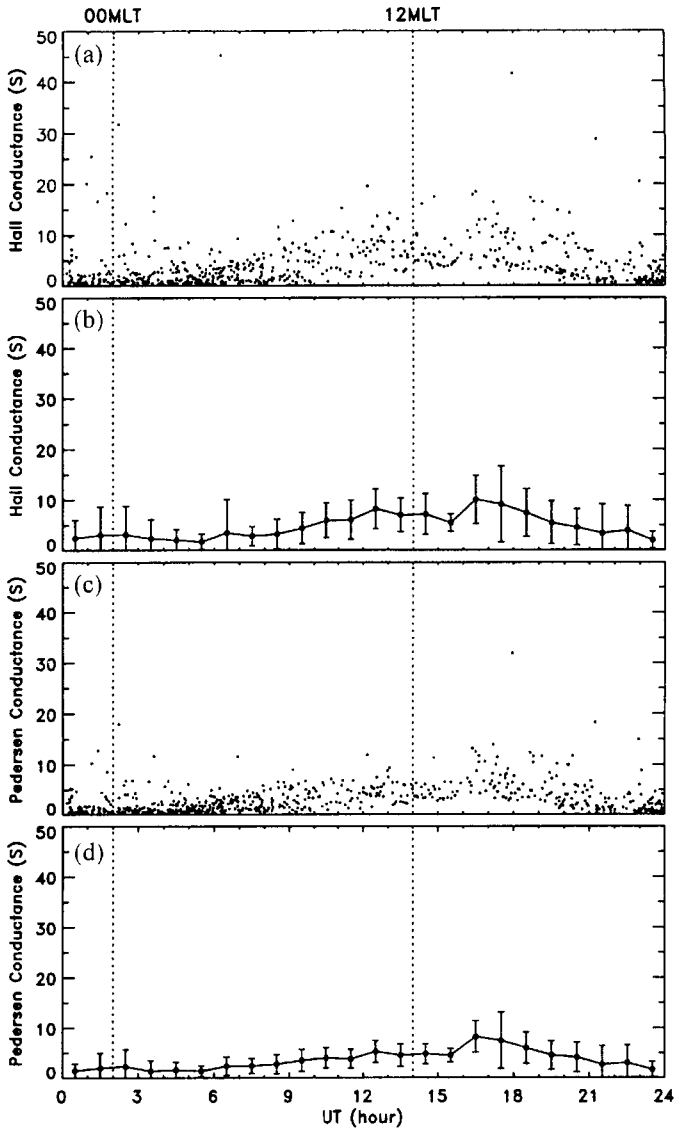

그림 2. Sondrestrom 레이더로 추정한 극관 영역 상공의 전기 전도도 분포. (a) 고도적분된 Hall 전기 전도도의 일변화 분포, (b) Hall 전기 전도도의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차, (c) 고도적분된 Pedersen 전기 전도도의 일변화 분포, (d) Pedersen 전기 전도도의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차.

서 Sondrestrom 지역이 양의 전위세포 및 음의 전위세포의 영향을 받을 확률이 대체로 비슷하다는 것을 의미한다. 따라서 시간 평균치가 매우 작은 값을 나타내는 것은 당연한 결과이다. 시간 평균치를 나타낸 그림 3(b)를 보면, 대체로 오전 영역인 0200 ~ 1100 MLT 구간에서는 남향 성분이, 그리고 1100 ~ 2000 MLT의 주로 오후 영역에서는 북향 성분이 강하다. 최대치는 남향 및 북향 성분이 0800 ~ 0900 MLT와 1300 ~ 1400 MLT에서 각각 약 25 mV/m 및 약 18 mV/m로 남향 성분이 우

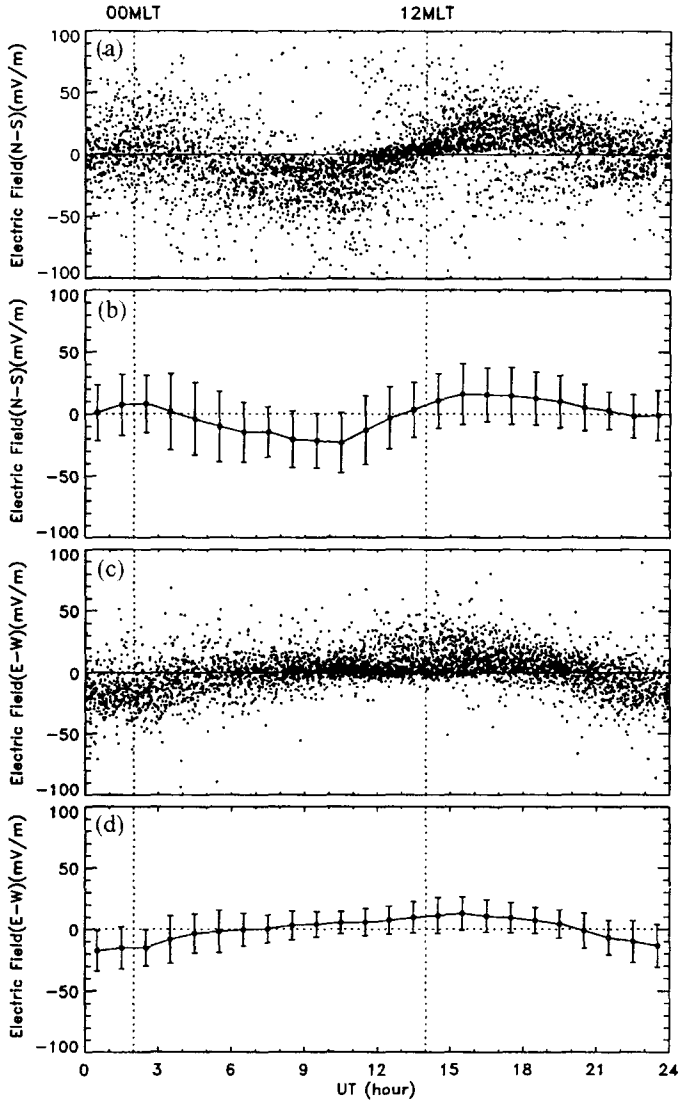

그림 3. Sondrestrom 레이더로 추정한 오로라 영역 상공의 전기장 분포. (a) 남북 성분 전기장의 일변화 분포, (b) 남북 성분 전기장의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차, (c) 동서 성분 전기장의 일변화 분포, (d) 동서 성분 전기장의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차.

세하다. Chatanika 레이더 관측(Ahn et al. 1999)의 경우는, 남향 및 북향의 최대치가 0300 ~ 0400 MLT와 1800 ~ 1900 MLT에서 각각 약 13 mV/m 및 약 23 mV/m로 북향 성분이 더 우세하다. 따라서 Chatanika에 비해 Sondrestrom의 경우가 북향 성분 전기장은 다소 약하지만, 남향 성분은 약 2배 더 강하다. 또한 최대치가 Chatanika의 경우는 새벽과 저녁 영역에 나타나는 반면, Sondrestrom은 낮쪽으로 치우쳐 나타난다.

그림 3(c)(d)는 동서 성분의 전기장 분포이다. 여기서 동향 성분은 양의 값으로 그리고 서향 성분은

음의 값으로 나타내었다. 0500~1200~1800 MLT의 낮 영역에서는 주로 동향 성분이, 1800~0000~0500 MLT의 밤 영역에서는 주로 서향 성분이 나타나며, 남북 성분보다 미약하다. 시간 평균 최대치는 동향 및 서향 성분이 1300~1400 MLT와 2200~2300 MLT에서 각각 약 12 mV/m 및 약 19 mV/m이다. 이는 남북 성분 전기장의 최소치가 나타나는 시간대와 거의 일치한다. 서향 성분 전기장은 대부분의 시간대에서 약 2~3 mV/m로 아주 미약한 Chatanika 지역(Ahn et al. 1999)보다 거의 4배 정도 강함을 볼 수 있다. 단지, 예외적으로 2200~2300 MLT에서 5 mV/m 정도의 큰 값을 나타냈다. 특히 오로라 영역에서 서향 성분 전기장의 최대치가 자정이전에 나타난다는 결과는 EISCAT 레이더 측정에 의한 Senior et al.(1990)과 Chatanika 레이더 측정에 의한 Ahn et al.(1999)의 결과와 잘 일치한다. 이와 같은 결과는 Shue & Weimer(1994)와 Peymirat & Fontaine(1977)에 의해서도 보고된 바 있다.

4. 오로라 영역 전리층의 수평 전류 분포

4.1. 전류 밀도와 지상 지자기 변화

극지방에서는 자기력선이 대체로 전리층과 직각을 이루기 때문에 전리층을 따라 수평으로 흐르는 전류는 동서 및 남북 방향 성분의 전류로 나눌 수 있다. Ohm의 법칙으로부터 전기 전도도와 전기장을 결합하여 동서 및 남북 방향으로 흐르는 고도 적분된 전류 밀도 J_E및 J_N을 다음과 같이 구하였다.

$$J_E = \Sigma_P E_E + \Sigma_H E_N \quad (1)$$

$$J_N = \Sigma_P E_N - \Sigma_H E_E \quad (2)$$

여기서, E_E와 E_N은 각각 동서 방향 및 남북 방향의 전리층 전기장이다. 그리고 동향 및 북향 성분은 양의 값을, 서향 및 남향 성분은 음의 값을 나타낸다.

전리층을 흐르는 전류에 의해 지상에는 지자기 변화가 야기된다. 한편, 전리층의 연직 규모에 비해서 전류는 비교적 얇은 판상으로 흐르기 때문에 극지방 전리층의 전류를 무한판상전류(infinite current sheet)로 가정한다면, 전리층 무한판상전류와 이 전류에 의해 야기되는 남북(ΔH) 및 동서(ΔD) 성분의 지상 지자기 변화와의 관계는 Biot-Savart의 법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Chapman & Bartels 1940).

$$\Delta H(nT) = \frac{1}{k}\frac{2\pi}{10} J_E(mA/m) \quad (3)$$

$$\Delta D(nT) = -\frac{1}{k}\frac{2\pi}{10} J_N(mA/m) \quad (4)$$

여기서, k는 지구 내부에서 발생되는 유도전기의 효과이다.

4.2. 전류 밀도의 분포

그림 1과 그림 3의 자료를 이용하여 식 (1)과 식 (2)로부터 전리층의 수평 전류 밀도 분포를 추정하였다. 그림 4(a)(b)는 동서 방향의 전류 밀도 분포로서, 정오를 포함한 오후 영역인 1030~1200~1900 MLT에서는 평균적으로 동향 전류가 흐르고, 저녁 영역에서 자정을 거쳐 아침 영역까지인 1900~0000~1030 MLT에서는 서향 전류가 분포한다. 시간 평균 최대치는 동향 및 서향 전류가 1300~1400 MLT와 0800~0900 MLT에서 각각 약 170 mA/m와 약 160 mA/m이다. 이렇게 동서 방향 전류가 낮 영역

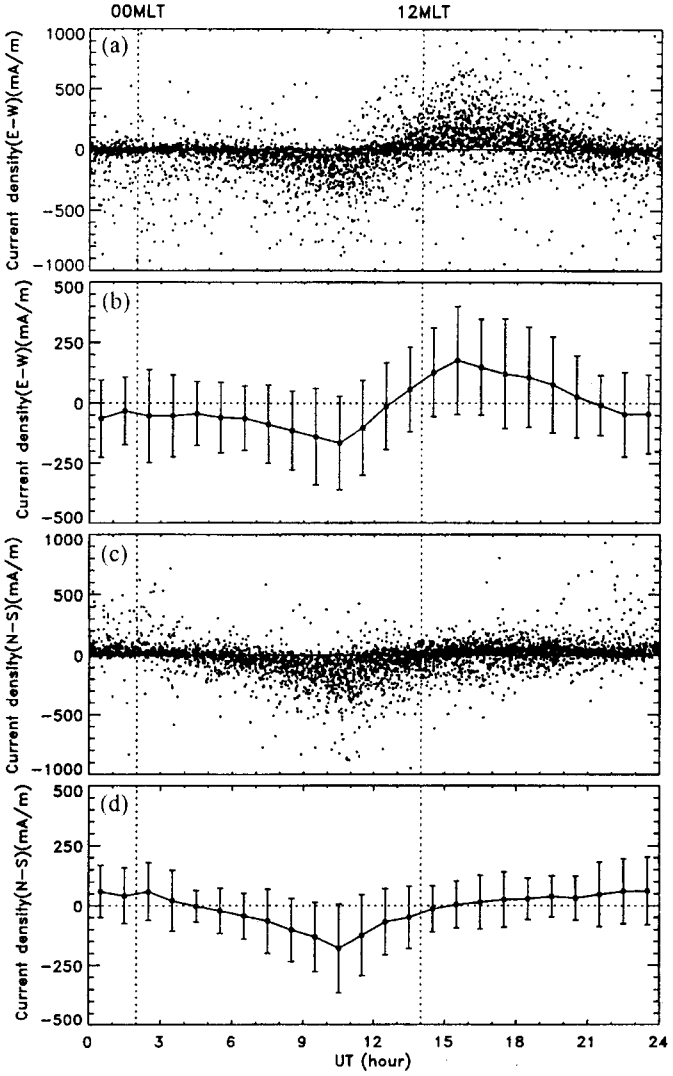

그림 4. 그림 1과 3의 전기 전도도와 전기장을 이용하여 추정한 Sondrestrom 상공 전리층의 전류 밀도 분포. (a) 동서 방향 전류의 일변화 분포, (b) 동서 방향 전류의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차, (c) 남북 방향 전류의 일변화 분포, (d) 남북 방향 전류의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차.

에서 강하게 흐르는 이유는 태양 EUV에 의한 전기 전도도와 낮 영역의 강한 남북 및 동서 방향 전기장 때문이다.

그림 4(c)(d)는 남북 방향의 전류 밀도 분포이다. 정오를 포함한 0220~1200~1320 MLT에서는 평균적으로 남향 전류가 흐르고, 자정을 포함한 주로 오후 영역인 1320~0000~0220 MLT에서는 북향 전류가 흐른다. 북향 전류는 시간 평균치가 약 50 mA/m 미만으로 미약하게 흐르는 반면, 남향 전류는 시간 평균 최대치가 정오 이전인 2000~2200 MLT에서 약 180 mA/m로 아주 강하게 흐른다. 이

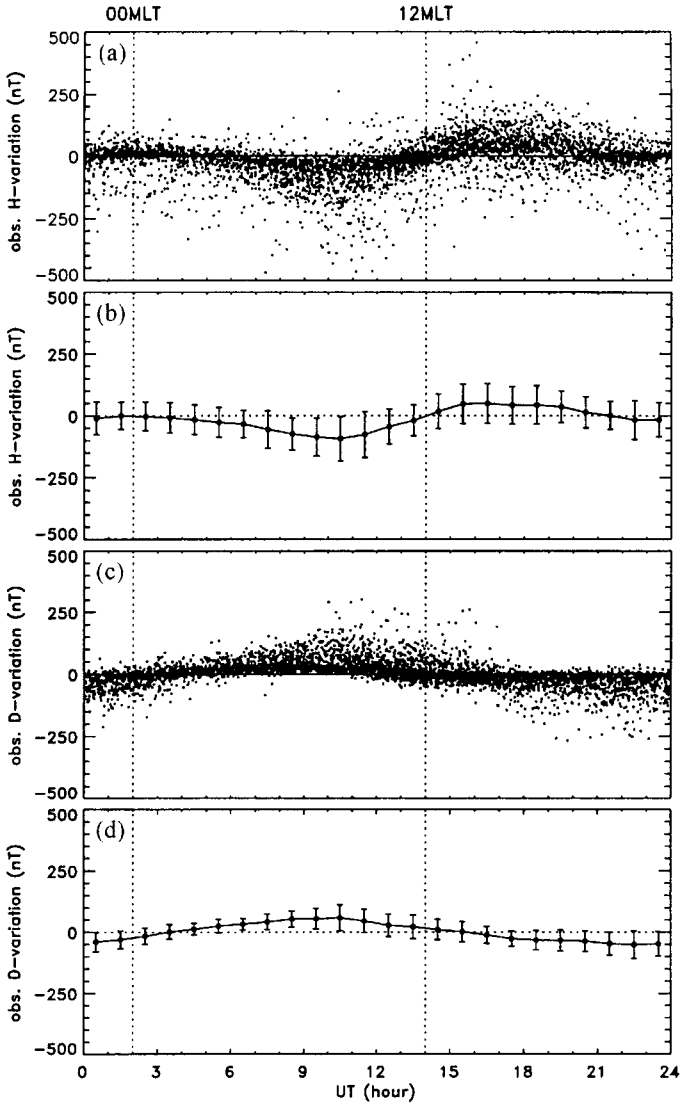

그림 5. Sondrestrom 자력계에 의해 기록된 지상 지자기 변화 분포. (a) 남북 방향 지상 지자기 변화의 일변화 분포, (b) 남북 방향 지상 지자기 변화의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차, (c) 동서 방향 지상 지자기 변화의 일변화 분포, (d) 동서 방향 지상 지자기 변화의 시간 평균치 및 그에 대한 표준편차.

는 정오 이전의 태양 EUV에 의한 전기 전도도와 강한 남향 성분 전기장에 의한 것으로 분석된다.

4.3. 전리층 수평 전류 밀도와 지상 지자기 변화와의 상관관계

그림 5는 Sondrestrom 자력계에 의해 기록된 시간에 따른 지상 지자기 변화 분포를 나타낸 것이다. 그림 5(a)(b)의 ΔH를 보면, 자정을 포함한 오전 영역인 1930~0000~1200 MLT에서는 대체로 남향 성분의 지자기 변화가 나타나고, 오후 영역인 1200~1930 MLT에서는 주로 북향 성분의 지자기

변화가 나타난다. 남향 및 북향 성분의 일변화의 시간 평균 최대치는 0800~0900 MLT와 1300~1400 MLT에서 각각 약 90 nT와 약 50 nT로 기록되었다. 그림 5(c)(d)의 ΔD를 보면, 정오를 포함한 주로 오전 영역인 0130~1200~1330 MLT에서는 대체로 동향 성분의 지자기 변화를 보이고, 자정을 포함한 오후 영역인 1330~0000~0130 MLT에서는 주로 서향 성분이 관측된다. 동향 및 서향 성분의 일변화의 시간 평균 최대치는 0800~0900 MLT와 2000~2200 MLT에서 각각 약 60 nT와 약 50 nT로 기록되었다. 비록 여기에서 나타내지는 않았지만 연직 성분의 지자기 변화(ΔZ)를 살펴보면, 오전 영역에서는 양의 값을 보이고, 오후 영역에서는 음의 값을 보인다. 그런데 오전 영역에는 서향 전류 그리고 오후 영역에는 동향 전류가 흐른다는 점을 고려한다면, Sondrestrom은 오로라 타원체의 중심에 대해서 대체로 극쪽에 위치함을 의미한다.

그림 6은 지상 지자기 변화 관측치($\Delta H_{obs}, \Delta D_{obs}$)와 레이더에 의해 추정된 고도 적분된 오로라 제트전류(J_E, J_N)사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서, 각 점들은 그림 4와 그림 5의 각 UT에 해당되는 평균치이다. 두 물리량 사이의 관계를 $J_E = a\Delta H_{obs} + b$, $J_N = a\Delta D_{obs} + b$와 같이 1차식으로 표현했으며, 그림에서 실선이 여기에 해당된다. 그리고 r은 상관계수를 나타낸다. 한편, 오로라제트전류를 무한판상으로 가정하고, 부도체 지구를 가정(k=1)한 경우와 완전한 전도체 지구를 가정(k=1/2)한 경우에 예상되는 지자기 변화와 전류 밀도 사이의 관계를 각각 점선과 파선으로 나타냈다.

그림 6(a)를 보면, ΔH가 음과 양인 영역에서 ΔH_{obs}와 J_E 사이의 상관계수가 각각 0.74와 0.88로 비교적 높다. 이는 지상의 ΔH는 주로 전리층의 동서 방향 전류에 의해 유발됨을 의미한다. 한편, ΔH가 음인 주로 오전 영역과 양인 주로 오후 영역에서 a가 각각 1.28와 3.22이다. 즉, 전리층 동서 방향 전류에 의해 야기되는 남북 방향의 지상 지자기 변화가 두 영역에서 각각 약 0.78 nT/(mA/m)와 약 0.31 nT/(mA/m)로, 동일 지역이라 하더라도 오전과 오후가 2배 이상 크게 차이가 남을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, Chatanika 지역에 대한 결과(Kamide & Brekke 1975)는 ΔH가 음과 양인 영역에서 전리층 동서 방향 전류에 의해 야기되는 남북 방향의 지상 지자기 변화가 각각 약 0.43 nT/(mA/m)와 0.26 nT/(mA/m)로 Sondrestrom과 큰 차이를 보인다. 실제로 전리층을 흐르는 판상전류가 무한히 넓은 것이 아니라 타원체를 따라 비교적 제한된 범위 내에서 흐르며, 오로라 제트 전류 중심으로부터의 거리 및 오로라 제트 전류의 위도에 따른 변화에도 영향을 받는다(Kamide & Brekke 1975). 이로 인해 동서 방향의 무한판상전류가 과소평가되며, 지상 지자기 변화 관측치와 레이더에 의해 추정되는 전리층 전류사이의 선형관계가 지역에 따라 다를 뿐 아니라, 동일한 오로라 영역이라 하더라도 오전과 오후가 다르다.

그림 6(b)에서 ΔD가 양인 주로 오전 영역을 보면, ΔD_{obs}와 J_N 사이의 상관계수가 -0.94로 아주 높다. 이는 지상의 ΔD가 전리층의 남북 방향을 흐르는 전류를 잘 반영해줌을 알 수 있다. 한편, 이 영역에서 $a = -2.79$로, 전리층 남북 방향 전류에 의해 야기되는 동서 방향의 지상 지자기 변화가 약 -0.36 nT/(mA/m)이다. ΔD가 양인 영역과 ΔH가 음인 영역이 거의 동일한 오전 영역임을 고려하면, 이는 한 지역에서 동일한 크기의 전리층 전류에 의해 지상에서는 ΔD가 ΔH에 비해서 1/2 이하로 관측된다는 의미이다. 실제로 ΔD와 관련된 전리층의 J_N는 연자기력선 전류와 연결되어 있어서, 우리가 관측한 지상의 ΔD는 J_N와 연자기력선 전류에 의한 지자기 변화 효과의 합이다. ΔD가 양인 오전 영역에서 연자기력선 전류는, 오로라 타원체의 북쪽 경계면을 따라서는 자기권으로부터 전

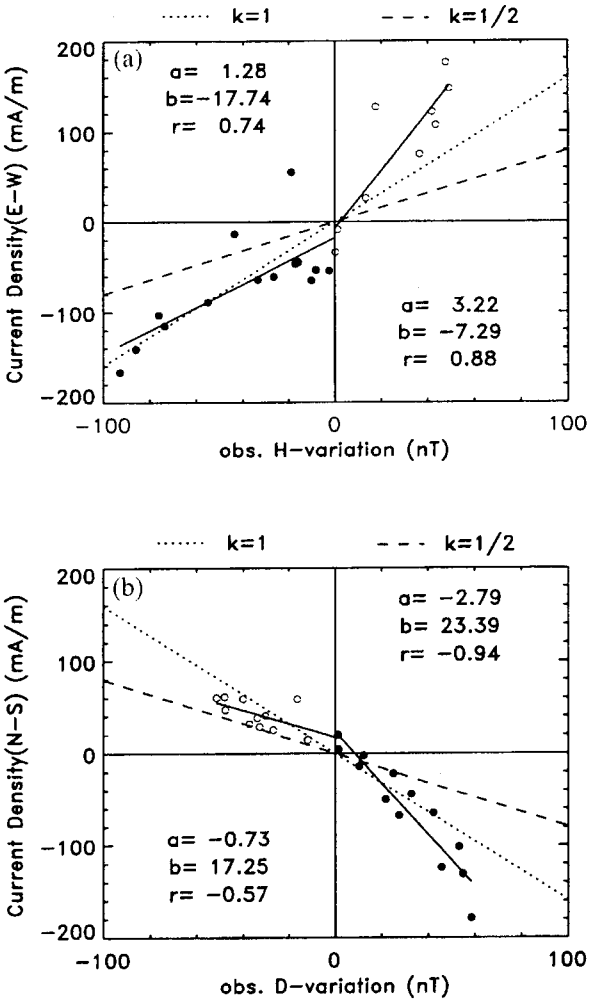

그림 6. 지상 지자기 변화 관측치와 레이더에 의해 추정된 전리층 전류 밀도 사이의 상관도. 점선 및 파선은 각각 부도체 지구를 가정(k=1)한 경우와 완전한 전도체 지구를 가정(k=1/2)한 경우에 예상되는 지자기 변화와 전류밀도 사이의 관계를 나타낸 것이다. 지상 지자기 변화 관측치($\Delta H_{obs}, \Delta D_{obs}$)와 레이더에 의해 추정된 오로라제트전류($J_E, J_N$) 사이의 관계를 $J_E = a\Delta H_{obs} + b$ 및 $J_N = a\Delta D_{obs} + b$로 나타내었다. r은 상관계수이다).

리층으로 유입되고(영역 1 전류), 남쪽 경계면을 따라서는 전리층으로부터 자기권으로 유출된다(영역 2 전류)(Iijima & Potemra 1976). 따라서 오전 영역의 오로라 타원체내에서는 영역 1과 영역 2 전류에 의해서 모두 서쪽 방향의 지자기 변화가 야기되고, J_N에 의해서 유도되는 동향의 ΔD를 감소시키는 결과를 가져온다. 결과적으로, ΔD의 경우는 ΔH의 경우에서 고려되어야 할 무한판상전류의 과소평가원인과 더불어 연자기력선 전류의 효과가 함께 고려되어야만 한다.

5. 결론 및 논의

자기권-열권-전리층의 상호작용을 이해하기 위해서는 극지방 전리층의 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 이를 위해, Sondrestrom 비간섭 산란 레이더 자료를 이용하여 전기전도도와 전기장 분포를 구함으로써 Sondrestrom 상공전리층의 기후학적 특성을 살펴보았다. 나아가 전기 전도도와 전기장을 이용하여 추정된 전리층 전류와 Sondrestrom 자력계에 의해 동시에 기록된 지상지자기 변화와의 상관관계도 조사하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

Sondrestrom 상공전리층의 전기전도도 분포는, 태양 EUV 복사와 관련된 주간의 경우는 Chatanika와 비슷한 경향을 나타낸다. 반면, 야간의 값은 현저히 미약하다. 즉 이 지역의 전기 전도도는 태양의 EUV 복사가 주로 결정한다. 극관 영역 전리층의 전기 전도도 분포는, 주간에는 오로라 영역과 비슷한 태양 EUV에 의한 분포를 보이는 반면, 야간에는 Hall 및 Pedersen 전기 전도도가 각각 평균 약 1.6과 1.2 siemen으로 아주 낮은 값을 보이는데, 이는 극관 영역에는 고에너지 오로라입자의 유입이 적음을 의미한다. 남북 성분 전기장은 0200 ~ 1100 MLT에서는 남향 성분이, 1100~0000~0200 MLT에서는 북향 성분이 나타나며, Chatanika에 비해 남향 성분은 강한 반면, 북향 성분은 약하다. 최대치가 새벽(0300~0400 MLT)과 저녁 영역(1800~1900 MLT)에 나타나는 Chatanika와는 달리, 낮쪽으로 치우쳐 나타난다. 동서 성분 전기장은 0500~1200~1800 MLT에서는 동향 성분이, 1800~0000~0500 MLT에서는 서향 성분이 나타나며, Chatanika에 비해 약 4배 정도 강하다. 전기 전도도와 전기장으로부터 오로라 영역의 전리층 전류 분포를 추정해 본 결과 Sondrestrom 상공의 동서 방향의 전류는 0600~1200~1800 MLT의 낮 영역에서 강하게 흐른다. 남북 방향의 전류는 정오 이전에 아주 강한 남향 전류가 흐른다. 이는 정오 이전의 강한 남향 성분 전기장과 태양 EUV 복사에 의한 높은 전기 전도도에 기인된 것이다. 레이더에 의해 추정된 전리층 동서 방향 전류와 지상에서 관측된 ΔH 사이에 높은 상관관계를 보였다. 하지만 지하의 유도전류효과까지를 고려한다면 지상에서 관측된 지자기 변화는 예상치보다 훨씬 과소평가되는 경향이 있다. 뿐만 아니라, ΔH가 음인 오전 영역과 양인 오후 영역에서 전리층 동서 방향 전류에 의해 야기되는 남북 방향의 지상 지자기 변화가 2배 이상의 차이를 보인다. 또한 Chatanika 지역에 대한 결과와도 큰 차이가 나타난다. 실제로 전리층을 흐르는 판상전류는 비교적 제한된 범위내에서 흐르고, 오로라 제트 전류 중심으로부터의 거리 및 오로라 제트 전류의 위도에 따른 변화에 영향을 받는다. 그리고 지상 지자기 변화 관측치와 레이더에 의해 추정되는 전리층 전류사이의 선형관계가 지역과 시각에 따라 다르게 나타난다. 한편 동일한 지역과 시각이라 하더라도, 전리층 전류에 의해 지상에서는 ΔD가 ΔH에 비해 1/2 이하로 관측된다. 이는 오로라 타원체의 북쪽과 남쪽 경계면에서의 연자기력선 전류 즉 영역 1과 영역 2 전류로 인해 유발되는 ΔD가 순전히 남북 전리층 전류에 의해 유발되는 ΔD를 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 따라서 ΔD의 경우는 ΔH의 경우에서 고려되어야 할 무한판상전류의 과소평가원인과 더불어 연자기력선 전류의 효과가 함께 고려되어야만 한다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-11300-002-2) 지원으로 수행되었음. 본 연구를 위해 CEDAR Data Base 이용에 도움을 주신 NCAR-HAO의 B. A. Emery 박사께 감사를 드린다. 그리고, Sondrestrom 레이더 자료를 제공해 주신 SRI의 J. P. Thayer 박사와 M. McCready 박사, Sondrestrom 자력계 자료를 제공해 주신 DMI의 J. Watermann 박사께도 감사를 드린다.

참고문헌

Ahn, B.-H., Emery, B. A., Kroehl, H. W., & Kamide, Y. 1999, JGR, 104, 10031

Araki, T., Schlegel, K., & Luhr, H. 1989, JGR, 94, 17185

Barton, C. E. 1997, J. Geomag. Geoelectr., 49, 123

Brekke, A., Doupnik, J. R., & Banks, P. M. 1974, JGR, 79, 3773

Chapman, S., & Bartels, J. 1940, Geomagnetism, vol.1 (Oxford: Clarendon)

Hardy, D. A., Gaussenhoven, M. S., & Holman, E. 1985, JGR, 90, 4229

Hardy, D. A., Gaussenhoven, M. S., Raistrick, R., & Mcneil, W. J. 1987, JGR, 92, 12275

Hedin, A. E. 1991, JGR, 82, 2851

Iijima, T., & Potemra, T. A. 1976, JGR, 81, 2165

Kamide, Y., Akasofu, S.-I., & Brekke, A. 1976, PSS, 24, 173

Kamide, Y., & Brekke, A. 1975, JGR, 80, 587

Kelly, J. D., Heinselman, C. J., Vickrey, J. F., & Vondark, R. R. 1995, Space Science Reviews, 71, 797

Peymirat, C., & Fontaine, D. 1997, Ann. Geophysicae., 15, 403

Popov, V. A., Papitashvili, V. O., & Watermann, J. F. 2001, Earth Planets Space, 53, 129

Senior, C., Fontaine, D., Caudal, G., Alcayde, D., & Fontanari, J. 1990, Ann. Geophysicae, 8, 257

Shue, J.-H., & Weimer, D. R. 1994, JGR, 99, 401