

6300 Å 대기광 자료 분석을 통한 고위도 열권 상부에서의 온도 변화

정 종 균 · 김 용 하

충남대학교 천문우주과학과

원 영 인 · 이 방 용

한국해양연구소 극지연구센터

A STUDY ON TEMPERATURE VARIATION OF THE UPPER THERMOSPHERE IN THE HIGH LATITUDE THROUGH THE ANALYSIS OF 6300 Å AIRGLOW DATA

Jong-Kyun Chung, Yong Ha Kim

Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University

Young-In Won and Bang Yong Lee

Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute

(Received April 30, 1997; Accepted May 15, 1997)

요 약

열권 상부의 온도는 일반적으로 태양 활동에 따라 변화하며, 특히 고위도 지역에서는 지자기 활동에 의해서도 크게 변화된다. 본 연구에서는 장기간에 걸쳐 관측된 열권 온도를 이용하여 태양 활동 지수 및 지자기 활동 지수와의 상관 관계를 정량적으로 분석하였다. 본 연구에 사용된 온도 자료는 미시간 대학에서 운용하고 있는 그린랜드의 두 관측소인 Thule Air Base(76.5° N, 68.4° W, $\Lambda = 86^\circ$)와 Søndre Strømfjord (67.0° N, 50.9° W, $\Lambda = 74^\circ$)에서 측정된 것으로 두 곳 모두 지리적 뿐만 아니라 지자기적으로도 고위도 지역에 위치하고 있다. 자료는 페브리-페로 간섭계를 이용하여 6300 Å 대기광을 관측한 것이며 관측기간은 Thule Air Base 관측소는 1986 ~ 1991년, Søndre Strømfjord 관측소는 1986 ~ 1994년이다. 본 연구에서 얻어진 분석 결과는 다음과 같다. (1) Thule 지역의 관측 온도와 태양 활동 지수와의 상관 관계는 $3 \leq Kp \leq 4$ 에서 가장 높게 나타나며 Søndre Strømfjord 지역의 상관 관계는 Kp 지수가 커질수록 증가함을 보인다. (2) 전반적인 온도는 고위도 지역인 Thule 지역에서 높지만, 태양 활동 지수 변화에 따른 온도 변화의 증가율은 Søndre Strømfjord 지역에서 더 크게 나타났다. (3) 겨울철 Thule 지역의 하루 온도 변화는 13-14 LT (LT=UT-4) 부근에 최대 온도를 가진 일일 주기(24 hrs) 변화를 보이지만, 태양 활동이 미약한 경우에는 반일 주기(12 hrs) 변화가 우세하게 나타났다. (4) 고층 대기분야에서 통용되는 MSIS86 모델과 VSH 모델은 여기서 분석된 관측치에 비해 전반적으로 낮은 온도를 예측하고 있으며, 이러한 차이는 특히 태양 활동이 증가함에 따라 더욱 심해짐을 보였다. 따라서 보다 많은 관측 자료를 이용한 새로운 열권 모델의 개발이 시급하다고 생각된다.

ABSTRACT

The temperature of the upper thermosphere is generally varied with the solar activity, and largely with geomagnetic activity in the high latitude. The data analyzed in this study are acquired at two ground stations, Thule Air Base(76.5° N, 68.4° W, $\Lambda = 86^\circ$) and Søndre Strømfjord (67.0° N, 50.9° W, $\Lambda = 74^\circ$), Greenland. Both stations are located in the high latitude not only geographically but also geomagnetically. The terrestrial night glow at 6300 Å from atomic oxygen has been observed from the two ground-based Fabry-Perot interferometers, during periods of 1986 ~ 1991 in Thule Air Base and of 1986 ~ 1994 in Søndre Strømfjord. Some features noted in this study are as follows: (1) The correlation between the solar activity and the measured thermospheric temperature is highest in the case of $3 \leq Kp \leq 4$ in Thule, and increases with the geomagnetic activity in Søndre Strømfjord. (2) The measured temperatures at Thule is generally higher than those at Søndre Strømfjord, but the latter shows steeper slope with the solar activity. (3) The harmonic analysis shows that the diurnal variation(24 hrs) is the main feature of the daily temperature variation with a temperature peak at about 13 ~ 14 LT (LT = UT-4). However, the semi-diurnal variation is evident during the period of weak solar activity. (4) Generally the predicted temperatures from both MSIS86 and VSH models are lower than the measured temperature, and this discrepancy grows as the solar activity increases. Therefore, we urge modelers to develop a new thermospheric model utilizing broader sets of measurements, especially for high solar activity.

1. 서 론

열권(thermosphere)은 지구 대기의 최상부층(약 80 ~ 600 km)으로서 태양과 지자기 활동(solar and geomagnetic activity)에 의한 우주 환경(space environment)의 영향에 다른 어느 대기권보다 가장 민감하게 반응하는 영역이다. 고위도 열권의 상부에서 열역학적 그리고 동역학적인 변화는 전반적으로 태양 활동에 따라 영향을 받지만, 국부적으로는 지자기 활동(geomagnetic activity)에 의한 이온권(ionosphere) 플라즈마와 열권 중성입자간의 상호 작용에도 영향을 받는다. 열권의 중성 입자에 대한 주된 가열원(heating source)은 태양의 극자외선과 자외선에 의한 광해리(photodissociation)와 광이온화(photoionization) 그리고 후속 화학반응들이다. 따라서 태양 활동에 따라 변화하는 태양 자외선(UV) 및 극자외선(EUV)의 세기가 열권 온도를 일차적으로 결정한다. 추가적으로 고위도 열권에서는 플라즈마와 중성입자의 충돌에 의한 가열, 즉 주울 열(Joule heat)이 중·저위도보다 매우 효과적으로 발생되는데, 이것은 지자기 활동과 깊은 관계를 가지고 있다 (Rees 1989 and references therein).

그러므로 장기간에 걸쳐 관측된 자료를 통해서 다양한 태양 활동과 지자기 활동에 대한 고위도 열권 상부의 변화를 연구하는 것은 매우 유용할 것이라 생각된다. 그러나 고위도라는 지역적 특수성과 시간적인 한계성으로 인하여 고위도 열권 상부에 관한 정량적인 분석 연구는 아직까지 제한적일 수밖에 없었다. 본 논문에서는 고위도 열권 상부에 직접적인 영향을 미치는 태양 및 지자기 활동의 세기에 따른 온도의 변화를 장기간의 대기광 관측자료를 사용하여 분석하였다.

본 논문에서 사용된 자료는 극관내에 위치하고 있는 Thule Air Base (76.5° N, 68.4° W, $\Lambda = 86^\circ$)와 오로라 지역(aurora oval) 근방에 위치한 Søndre Strømfjord (67.0° N, 50.9° W, $\Lambda = 74^\circ$)에서 얻어졌다. 두 관측소는 각각 1985년과 1983년부터 미시간 대학(University of Michigan)의 SPRL(Space Physics Research Laboratory)에 의해서 현재까지 운용되고 있다. 관측 장비는 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer, FPI)이며, 이것을 이용하여 열권 상부의 중성 산소 원자, O(¹D)에서 발생하는 6300 Å 파장의 대기광(airglow)을 관측한다. 관측된 6300 Å 선(line)의 도플러 선폭(Doppler line width)으로부터 열권 상부 약 250 km 고도의 온도가 도출되었다 (Won 1994). 관측 기간은 Thule Air Base 관측소는 1986 ~ 1991년이고, Søndre Strømfjord 관측소는 1986 ~ 1994년이다. 이와 같이 장기간에 걸쳐 관측된 자료에는 태양 11년 주기 중에서 극대기(solar maximum)와 극저기(solar minimum)가 모두 포함되어 있다. 종전의 대부분의 연구는 어떤 특정한 우주 환경에 대해서만 중점적으로 이루어졌으며, 태양 활동이나 지자기 활동의 여러 상황에 대한 전체적인 분석 연구는 매우 부족하였다 (Killeen *et al.* 1995). 그 결과 모델에 의한 온도 예측도 모델이 사용한 자료의 부족으로 인하여 실제 관측치와 많은 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 태양 및 지자기 활동에 대한 다양한 자료를 분석하고 있으므로, 향후 열권 온도를 예측하는 새로운 모델 개발에 많은 도움을 줄 수 있을 것이라 생각된다.

2. 자 료

2-1 태양 및 지자기 활동 자료

열권에서 광해리와 광이온화를 발생시키는 태양의 파장은 주로 UV와 EUV이다. 그러나 이와 같은 짧은 파장의 빛은 대기중에서 완전히 흡수되므로 지상에서의 측정은 불가능하다. 따라서 태양 UV와 EUV의 세기와 좋은 상관 관계를 가진 태양의 10.7 cm (2800 MHz) 전파를 이용하여 태양 활동 정도를 추정한다. 즉 대기에 흡수되지 않고 지상에 도달하는 이 전파의 세기를 측정하여 F10.7 지수로 수치화하여 태양 활동을 대표하는 지수로 널리 사용하고 있다. 지자기 활동에 대한 수치적인 지수는 전세계적으로 분포된 지자기 관측소에서 측정된 자력계(Magnetometer)자료를 이용하여 3시간 간격으로 평균한 Kp 지수이다. 본 연구에서는 열권의 온도와 F10.7과 Kp 지수를 날짜와 시간(UT)에 따라 자료화(database)하여 분석을 하였다. 그러나 모델값을 계산하기 위해 입력되는 지자기 지수는 Ap 지수를 사용했는데 해당 조건에서의 Kp지수를 Ap지수로 변환하여 사용하였다.

그림 1과 그림 2는 Thule Air Base와 Søndre Strømfjord 에서 관측기간중 F10.7 지수의 분포를 나

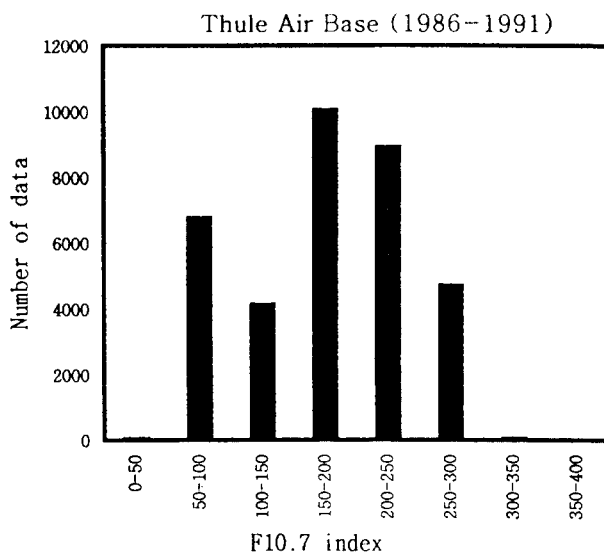


그림 1. Thule 관측소에서 관측 기간중의 F10.7 지수 자료 분포.

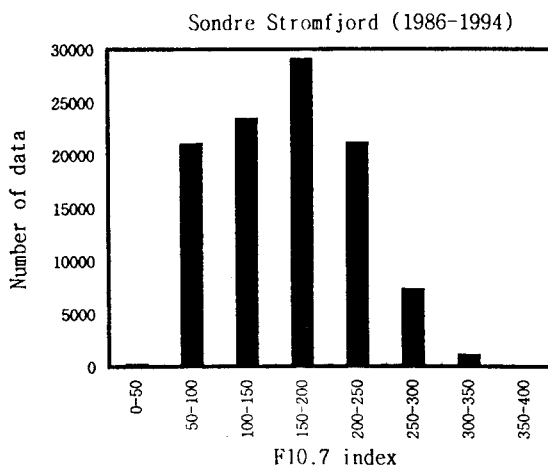


그림 2. Søndre Strømfjord 관측소에서 관측 기간중의 F10.7 자료 분포.

타내고 있다. 가로축은 F10.7 지수를 나타내고 세로축은 자료의 수를 나타낸 것이다. 분석의 편의상 임의적으로 태양 활동의 정도를 3단계로 분류하여 F10.7 지수를 다음과 같은 구간을 정해서 그에 따른 온도의 변화를 살펴보았다: 1) $0 \leq F10.7 \leq 100$, 태양 활동이 낮은 경우, 2) $100 \leq F10.7 \leq 200$, 태양 활동이 중간 정도, 3) $F10.7 > 200$, 태양 활동이 강한 경우.

그림 3과 그림 4는 지자기 활동을 나타내는 대표적 지수인 Kp지수가 관측기간중 어떻게 분포하였는지를 보여주고 있다. Kp 지수의 경우도 F10.7 지수와 마찬가지로 지자기 활동이 조용할 때 ($0 \leq Kp \leq 2$), 중간 정도의 활동인 때 ($3 \leq Kp \leq 4$), 그리고 지자기 교란이 매우 극심한 때 ($5 \leq Kp \leq 9$)로 분류하여 그에 따른 온도의 변화를 분석하였다. 그림에 보인대로 본연구의 자료는 태양 활동과 지자기 활동의 모든 상황에 대해 비교적 넓게 분포하고 있으므로, 이에 따른 열권 온도의 변화가 폭넓을 것이라 예상된다.

2-2 온도 자료의 특성

고위도 지역에서 열권 상부에 대한 연구는 그 지역적인 특수성으로 인해 중 저위도 지역과 비교해 볼 때 장기간에 걸친 관측이 거의 이루어지지 않았다. 종전의 열권 온도에 대한 연구들은 대부분 인공 위성이나 지상 관측소를 이용하여 특이한 우주 환경 상황에 초점을 맞추어 왔다. 인공 위성을 이용한 관측은 넓은 지역을 관측할 수 있다는 장점이 있으나, 장기간 지속적인 관측의 어려움 때문에 태양 활동과 지자기 활동의 모든 경우에 대한 온도 변화를 측정하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서 사용된 온도자료는 Thule Air Base 관측소에서 측정된 1986 ~ 1991년 기간의 5년간 자료와 Søndre Strømfjord 관측소에서 측정된 1986 ~ 1994년 기간의 8년간 자료로서, 태양 활동의 극대기와 극저기를 모두 포함하고 있다. 따라서 다양한 태양 활동에 대한 온도의 변화를 파악하는 것은 물론, 그림 3, 4의 Kp 자료 수에서 알 수 있듯이 지자기 활동에 대한 열권 온도의 변화를 분석하는 것도 동시에 가능하다.

그림 5는 Thule Air Base 관측소와 Søndre Strømfjord 관측소의 위치를 보여주고 있다. Thule Air Base 관측소의 경우에는 지자기선이 수렴하고 있는 극관내에 위치하고 있으며, Søndre Strømfjord

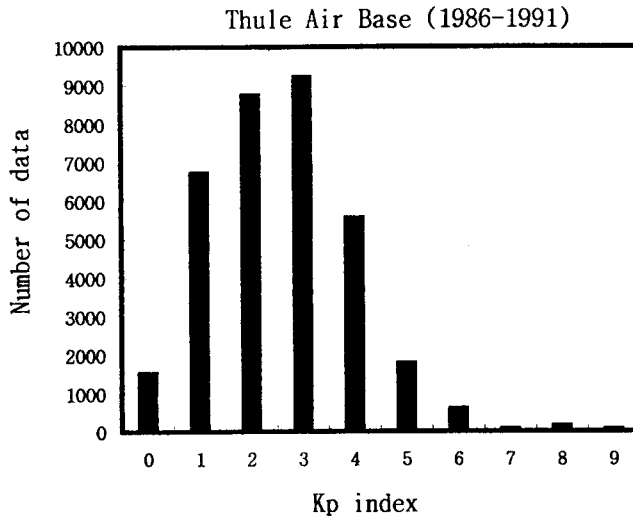


그림 3. Thule 관측소에서 관측 기간중의 Kp 자료 분포.

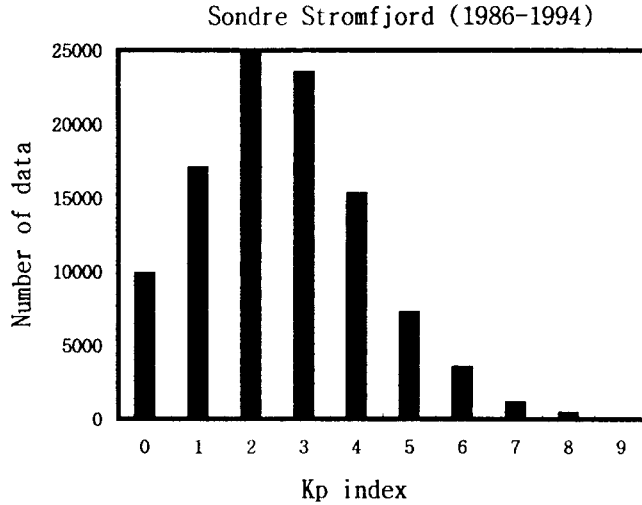


그림 4. Søndre Strømfjord 관측소에서 관측 기간중의 Kp 자료 분포.

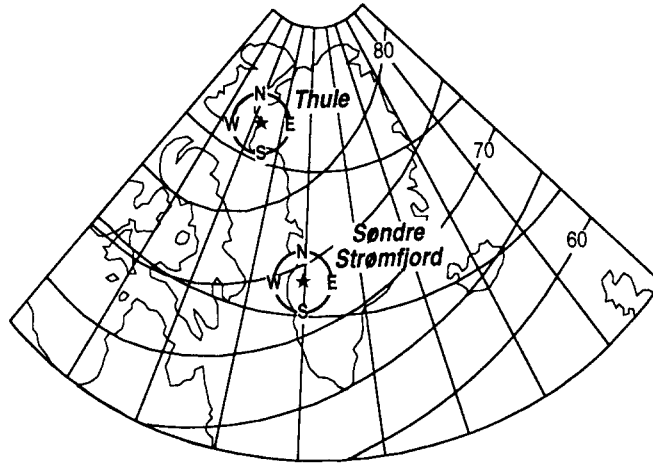


그림 5. Greenland 에 위치한 Thule 와 Søndre Strømfjord 관측소의 지자기 및 지리적인 위치 (지도상 표시된 숫자는 지자기 위도이고, 그 선과 교차하는 가로선은 지리적 위도선이다).

관측소는 오로라 지역의 인근에 위치하고 있다. 관측은 동서남북 각각의 방향에 대해 수행하므로 한 지역에서 방향에 따른 온도의 차이를 분석하는 것도 의의가 있을 것으로 생각된다. 관측 각도는 45°이고 6300 Å 선이 방출되는 고도가 약 250 km이므로 각 방향에 대한 온도는 관측지로부터 약 250 km 지점의 하늘이다. 또한 두 관측소가 서로 다른 지리적 및 지자기적 위도에 위치함으로서 태양 활동과 지자기 활동에 대한 온도의 변화의 특성에 차이가 있을 것으로 예상된다.

표 1. F10.7 지수에 대한 열린 상부 온도의 상관 계수 (Thule Air Base, 1986 ~ 1991년).

Kp구간	방위	a(K)	b	R	Kp구간	방위	a(K)	b	R	Kp구간	방위	a(K)	b	R
0 ~ 2	북	773.9	2.4	0.56	3 ~ 4	북	797.3	3.1	0.64	5 ~ 9	북	883.0	3.1	0.58
	동	768.3	2.4	0.57		동	787.4	3.0	0.61		동	875.3	2.8	0.52
	남	731.1	3.1	0.64		남	762.2	3.1	0.62		남	953.0	2.3	0.41
	서	766.6	2.4	0.55		서	782.3	3.1	0.63		서	939.6	2.7	0.49

표 2. F10.7 지수에 대한 열린 상부 온도의 상관 계수 (Søndre Strømfjord, 1986 ~ 1994년).

Kp구간	방위	a(K)	b	R	Kp구간	방위	a(K)	b	R	Kp구간	방위	a(K)	b	R
0 ~ 2	북	724.3	3.2	0.56	3 ~ 4	북	723.2	3.6	0.59	5 ~ 9	북	864.4	3.8	0.63
	동	718.4	3.1	0.55		동	723.8	3.4	0.58		동	852.0	3.8	0.62
	남	713.0	3.0	0.55		남	700.2	3.5	0.59		남	853.1	3.6	0.60
	서	709.2	3.2	0.56		서	720.0	3.5	0.58		서	846.9	3.8	0.62

3. 태양 활동과 지자기 활동에 따른 온도의 변화

관측된 온도와 태양 활동의 정도를 나타내는 F10.7 지수를 최소자승법(least square fitting)을 사용하여

$$T = a + b F10.7 \tag{1}$$

의 형태로 태양 활동과 온도의 관계를 나타내었다. 계수 a, b 그리고 상관 계수 R 을 3단계로 구분된 태양 활동 및 지자기 활동 구간에 대해 동서남북의 방향에 따라 온도의 변화를 분석하였다. 여기서 T 는 근사 온도(fitting temperature)이고 계수 a 는 태양 활동을 배제했을 때인 절편 온도, 계수 b 는 태양 활동에 대한 온도의 증가율을 의미하며, R 은 선형 상관 계수(linear correlation parameter)이다. 표 1과 표 2는 Thule Air Base와 Søndre Strømfjord의 각각의 관측소에서 관측된 온도와 태양 활동의 상관 관계이며, 각 조건에 대해 다음과 같은 특징을 갖고 있는 것으로 분석되었다.

(1) 온도와 태양 활동과의 상관 관계(R)

Thule 지역에서는 $3 \leq Kp \leq 4$ 에서 가장 높은 상관 관계를 갖고 있으며, $5 \leq Kp \leq 9$ 에서 가장 낮은 상관 관계를 보이고 있다. 한편 Søndre Strømfjord 지역에서는 Kp 지수가 커짐에 따라 상관 관계가 계속적으로 증가됨을 볼 수 있다. Søndre Strømfjord 지역이 같은 지자기 활동에 대해서 방향에 따라 거의 일정한 값을 유지하는데 비해, Thule 지역에서는 방향에 따라서는 상관 관계가 일정하게 나타나고 있지 않다. 극관내에 위치하고 있으며 지자기 위도상으로 더 고위도인 Thule 지역에서는 방향에 따라 열린 온도가 자자기 활동에 의해 영향받는 정도에 차이가 있음을 알 수 있다.

(2) 태양 활동에 의한 온도 변화 증가율(b)

태양 활동이 없을 경우라고 가정된 온도(절편 온도, a)는 전반적으로 Thule 지역이 Søndre Strømfjord 지역보다 높게 나타나지만, 태양 활동에 의한 온도 증가율은 Søndre Strømfjord 지역이

높게 나타나고 있다. Søndre Strømfjord 지역이 Kp 지수가 증가함에 따라 온도 증가율(b)이 높아지는 것에 비해, Thule 지역에서는 $3 \leq Kp \leq 4$ 인 상황에서 가장 높게 나타나고 있다. 방향에 따른 온도 증가율을 살펴보면 Søndre Strømfjord 지역이 다소 일정한 값들을 갖는데 비해, Thule 지역에서는 $5 \leq Kp \leq 9$ 에서 매우 상이한 온도 증가율을 보이고 있다. 따라서 앞의 상관 관계 분석에서도 지적하였듯이, 고위도인 Thule 지역에서는 지자기 활동이 방향에 따라 다양하게 열권 온도에 영향을 준다고 생각할 수 있다. 그림 6은 남쪽 방향에서 지자기 활동이 매우 약한($0 \leq Kp \leq 2$) 때의 온도이고 그림 7은 북쪽 방향에서 지자기 활동이 매우 강한($5 \leq Kp \leq 9$) 때의 온도이다. 그림의 왼쪽 상단의 숫자는 관측 일수이고 세로축은 온도, 가로축은 F10.7 지수이다. 점은 관측 온도이고 실선은 F10.7 지수와 온도와의 1차 근사식이다. 그림 6은 2000 K를 넘는 경우가 거의 없으나 그림 7의 경우를 보면 2500 K를 넘는 경우가 있다. 이와 같이 지자기 활동과 방향에 대해서 열권의 온도 차이는 약 500 K 정도의 변화를 보이고 있다.

(3) 근사 온도(fitting temperature)와 MSIS-86 온도의 비교

표 3은 Thule와 Søndre Strømfjord의 두 지역에서 관측된 온도를 식 (1)의 관계를 이용하여 근사시킨 온도와 MSIS-86 모델에 의해 계산된 온도를 비교하여 나타내었다. F10.7 지수는 $0 \leq F10.7 \leq 100$, $100 \leq F10.7 \leq 200$, $200 \leq F10.7 \leq 400$ 의 세 경우로 구분한 후 각 구간의 평균값을 취했으며, Kp 지수는 $0 \leq Kp \leq 2$, $3 \leq Kp \leq 4$, $5 \leq Kp \leq 9$ 의 각각의 구간의 지수값을 Ap 지수로 변환한 후 평균하여 모델의 입력값으로 사용하였다. 표 3에서 보는 바와 같이 모델과 관측 온도와는 평균적으로 100 K 정도의 차이가 있으며, 이러한 차이는 태양활동이 활발해 질수록 커지는 것을 볼 수 있다. 특히 태양 활동에 따른 온

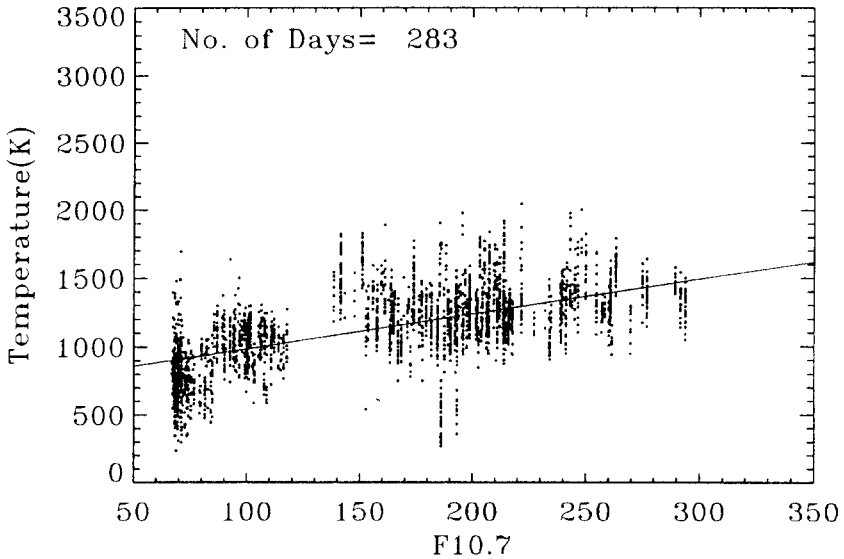


그림 6. Thule 관측소에서 관측한 태양 활동에 따른 열권 상부의 온도 변화 (남쪽 방향, $0 \leq Kp \leq 2$, 관측일=283일).

표 3. MSIS-86 모델 온도와 근사 계산식(식 1)에 의한 열권온도.

관측소	F10.7	Ap	MSIS-86 모델 (K)	근사 온도 (K)
Thule Air Base	78.5	5.2	779	948
		19.5	912	1025
		86.5	1106	1125
	157.6	5.2	1011	1138
		19.5	1136	1271
		86.5	1322	1339
	238.4	5.2	1172	1332
		19.5	1297	1521
		86.5	1487	1760
Søndre Strømfjord	78.5	5.2	777	959
		19.5	878	992
		86.5	1125	1152
	157.6	5.2	1138	1205
		19.5	1271	1269
		86.5	1339	1453
	238.4	5.2	1332	1455
		19.5	1521	1551
		86.5	1557	1760

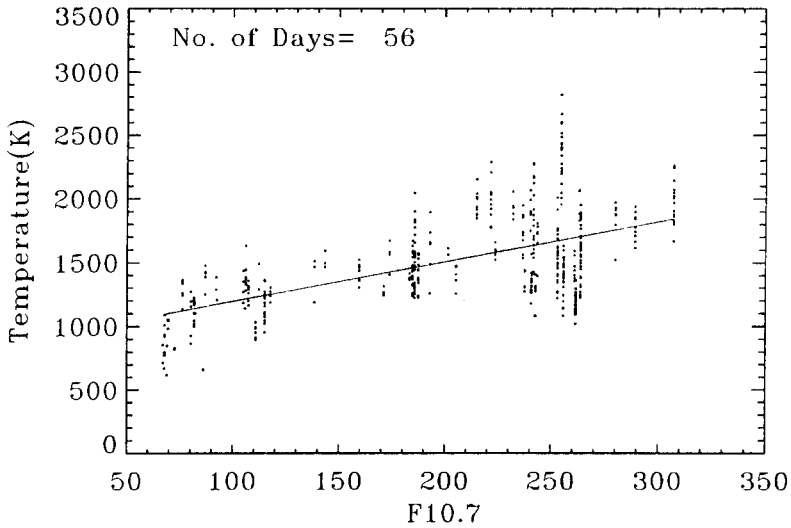


그림 7. Thule 관측소에서 관측한 태양 활동에 따른 열권 상부의 온도 변화 (남쪽 방향, $5 \leq Kp \leq 9$, 관측일=56일).

도 증가율이 큰 Søndre Strømfjord 지역의 경우에는 F10.7 지수가 238.4인 경우에 300 K 이상의 차이를 보이고 있다. 참고로 MSIS-86 모델의 예측범위는 $F10.7 \leq 230$ 이며 (Hedin 1987), 태양활동지수가 이 범위를 벗어날 경우 정확한 예측을 할 수 없기에, 태양 활동이 강할 때 관측 온도와 많은 차이를 보이는 것은 당연하다.

4. 시간에 따른 온도의 변화

열권에서의 주된 가열은 크게 두 가지로 나누어 생각해 볼 수가 있다. 첫째는 태양의 극자외선 및 자외선에 의한 대기 분자들의 광해리와 광이온화 작용으로 생성된 이온 및 활성분자(radical)가 주위 대기분자들과 화학 반응을 할 때 발생하는 열이다. 태양에 의한 가열은 시간에 따라 달라지므로 열권의 온도는 기본적으로 일주 변화(diurnal variation)를 보일 것이다. 둘째는 고위도 이온권(ionosphere)에 형성된 전기장에 의해 발생하는 주울열(Joule heating)이다. 주울열을 발생시키는 이온 순환 세포(ion circulation cell)는 겨울철에 밤 지역에 위치하기 때문에 지자기 활동이 활발해 질 경우에 밤 시간대의 온도가 상당히 상승될 것이다(McCormac *et al.* 1988). 그러므로 이온 순환 의한 가열은 시간적으로 밤 시간대의 열권 온도를 상승시키므로, 태양에 의한 일주(daily) 변화에 추가적 영향을 주리라 생각된다. 본 연구에서는 열권의 온도의 일일 변화에 대해 분석하기 위해, 자료를 계절별로 나누어 열권 온도의 UT 시간에 따른 변화를 그려보았다.

Søndre Strømfjord 관측소의 위치는 지리적 위도가 낮은 관계로 낮시간 때에는 관측이 거의 불가능하므로 일일 변화에 대한 분석이 불가능하다. 그러나 Thule Air Base 관측소의 경우에는 지자기 위도가 86°로서 지자기 활동에 많은 영향을 받는 극관내에 위치하고 있으며 지리적 위도 (76.5° N)도 겨울철에는 24시간 자료를 획득하기에 용이한 곳에 위치하고 있다. 겨울철(12월 1일 ~ 1월 31일)에 Thule Air Base 관측소에서 측정된 온도 자료를 일일 주기 혹은 반일 주기에 대한 변화를 아래와 같이 근사시켜 분석하였으며, 그 결과를 표 4에 정리하였다.

$$T = C + a \cos(\omega t + \delta_1) + b \cos(2\omega t + \delta_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 t 는 세계시(Universal Time, UT)이고 C 는 평균 온도, $\omega = 2\pi/24$, a 는 일주 변화 진폭 계수(diurnal variation amplitude coefficient), b 는 반일주 변화 진폭 계수(semidiurnal variation amplitude coefficient), 위상 δ_1 과 δ_2 는 근사 온도(fitting temperature)에서 최고 온도가 발생한 시간이다. 참고적으로 Thule Air Base 관측소에서의 지방시(Local Time)는 UT보다 약 4시간 느리다. 그림 8과 9는 UT에 따른 온도 변화의 예를 보여주고 있다. 세로축은 온도를, 가로축은 시간 (UT)을 나타낸다. 그림에서 네모는 1시간 간격으로 평균된 온도이고 마름모는 VSH 모델에 의해 계산된 온도, *는 MSIS-86 모델에 의해 계산된 온도이다. 여기서 VSH 모델은 열권전지구순환 모델 (Thermospheric Global Circulation Model, TGCM, Killeen *et al.* 1991)을 개발한 T. L. Killeen에 의해 제공되었다. 평

표 4. 열권 온도의 UT에 따른 변화계수 (겨울철 Thule 지역).

F10.7	Kp	a	b	δ_1	δ_2	F10.7	Kp	a	b	δ_1	δ_2	F10.7	Kp	a	b	δ_1	δ_2
0 ~ 100	0 ~ 2	46	49	3	5	100 ~ 200	0 ~ 2	69	7	18	6	200 ~ 400	0 ~ 2	111	47	17	9
	3 ~ 4	16	59	1	0		3 ~ 4	107	51	18	2		3 ~ 4	112	31	18	6

균 온도에 위에 나타난 곡선은 식 (2)에 의해 계산된 근사 곡선이다. *의 위 아래로 표현된 막대는 평균 온도에 대한 표준 편차이다.

일반적으로 일일 최대 온도는 17 ~ 18 UT (13 ~ 14 LT) 부근에서 발생하지만, 상황에 따라 많은 변화를 보이며 특히 태양활동이 미약한 경우에는 일정치 않게 나타나고 있다 (그림 8, 9 참조). 한가지 주목할 만한 사항으로는, 태양활동이 미약한 경우에는 반일주 진폭 b가 일주 진폭 a보다 커서, 온도 변화의 주된 양상이 됨을 볼 수 있다. 그러나 태양활동이 미약한 경우를 제외하면 일주변화가 반일주변화보다 우세하게 나타난다. 이 일주 변화폭은 태양활동이 활발해질수록 커지는 것을 볼 수 있다. 아울러 일주변화의 위상은 17 ~ 18 UT로 비교적 일정한 값을 보여주고 있다. 이에 반해 반일주변화의 진폭은 태양활동과는 커다란 관련이 없어 보이며 그 위상은 다소 불규칙적으로 나타나고 있다. 그림 8은 태양 활동이 매우 활발하고($200 \leq F10.7 \leq 400$), 지자기 활동이 어느 정도 강한($3 \leq Kp \leq 4$) 경우로 일주 변화가 매우 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면에 그림 9는 지자기 활동은 같으나 태양 활동이 매우 약한($0 \leq F10.7 \leq 100$) 경우이다. 이 경우는 일주 변화가 나타나고 있지 않으며 오히려 반일주 변화가 뚜렷히 보인다. 결국 태양 활동이 활발해 질수록 일주 변화가 뚜렷히 나타나고 있다. 그런데 그림 10($200 \leq F10.7 \leq 400$, $5 \leq Kp \leq 9$)을 보면 온도의 변화는 일주 변화를 보인다고 하더라도 그림 8과는 다른 모습을 하고 있다. 이 경우는 태양 활동과 지자기 활동이 모두 매우 활발하여 전체적으로 높은 온도를 유지하며 22 UT에 최대 온도 약 2500 K를 기록하고 있다. 또한 약 06 UT부터 22 UT까지 온도가 계속 상승하는 특이한 모습을 보이고 있다. 이것은 보통 일일 최대 온도 발생시간인 17 ~ 18 UT 이후에도 열권의 온도를 상승시킬만한 추가적 에너지원이 존재함을 암시한다. 추가적 에너지원으로 가장 중요한 것은 주울 열로서, 주로 오후에서 저녁 시간대에 분포한다고 알려져있다 (Rees &

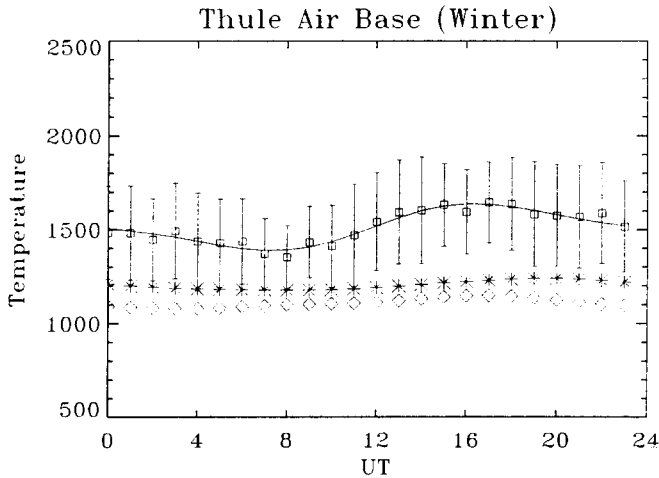


그림 8. 겨울철 Thule 관측소에서 관측한 하루 동안의 열권 상부의 온도 변화 ($200 \leq F10.7 \leq 400$, $3 \leq Kp \leq 4$). 네모는 관측 온도, 마름모는 VSH 모델 온도, *는 MSIS86 온도.

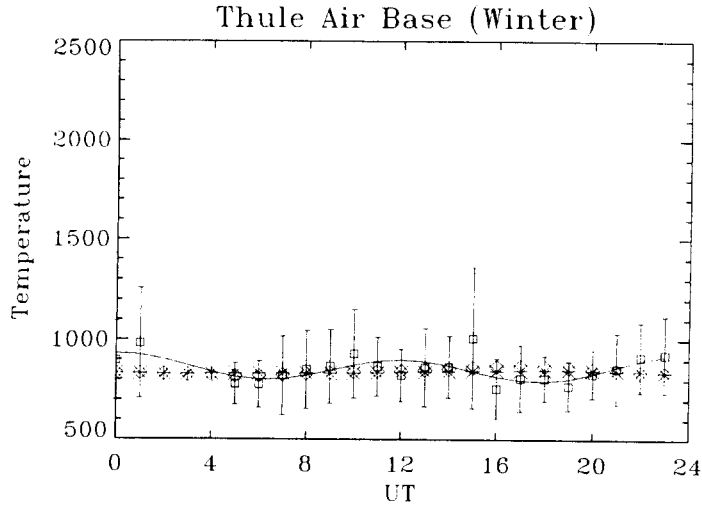


그림 9. 겨울철 Thule 관측소에서 관측한 하루 동안의 열권 상부의 온도 변화 ($100 \leq F10.7 \leq 200$, $3 \leq Kp \leq 4$). 기호는 그림 8 과 같음.

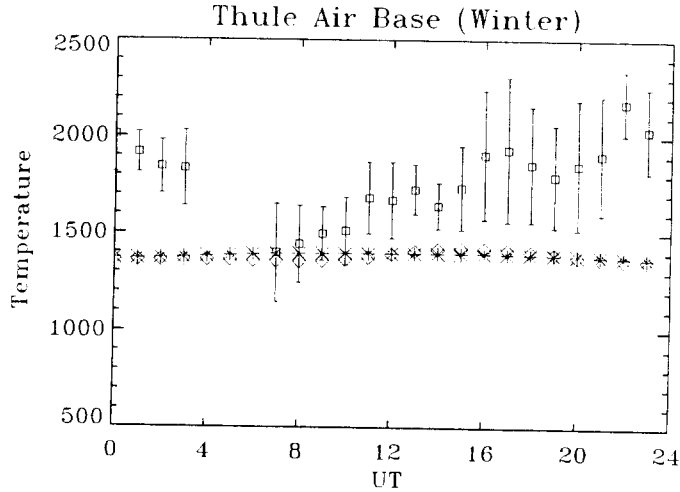


그림 10. 겨울철 Thule 관측소에서 관측한 하루 동안의 열권 상부의 온도 변화 ($200 \leq F10.7 \leq 400$, $5 \leq Kp \leq 9$). UT=07부터 UT=22까지 약 800 K 정도의 온도 증가를 보인다. 기호는 그림 8과 같음.

Fuller-Rowell 1991). 그림 11은 VSH 모델에 의해 고도 250 km와 Thule 지역에 같은 조건의 태양 활동과 지자기 활동에 대해 계산된 전자 밀도의 변화인데 그림 10의 열권 대기 온도 변화와 매우 유사한 변화를 보이고 있다. 이것은 지자기 활동이 매우 강할 때 전자 밀도의 증가가 Pederson 전도율을 증가시켜 많은 양의 전류를 흐르게 함으로서 주울 열을 증가시킨다는 논리를 지지하고 있다.

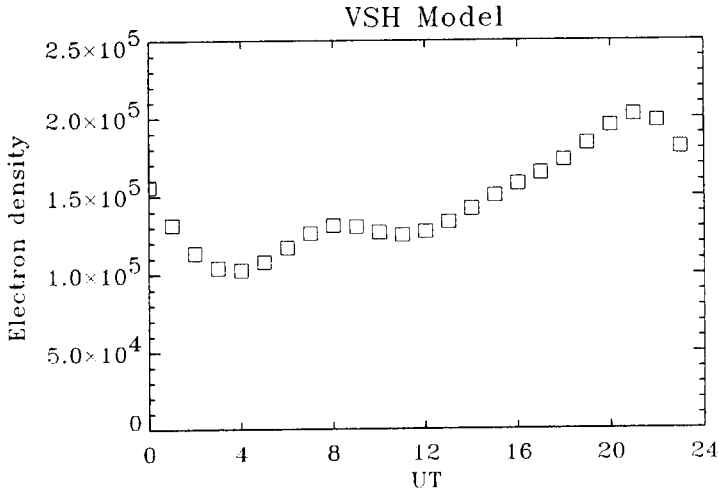


그림 11. VSH 모델에 의해 계산된 고도 250 km에서의 전자밀도의 변화. 그림 10과 상당히 유사하다 ($200 \leq F10.7 \leq 400$, $5 \leq Kp \leq 9$).

5. 토의 및 요약

본 연구에서는 고위도 열권 상부(~ 250 km)의 산소 원자, O(¹D)에서 발생되는 6300 Å 대기광을 FPI를 이용하여 관측한 온도 자료를 분석하였다. 관측 장소는 미시간 대학(University of Michigan)에서 운영하고 있는 Thule Air Base(76.5° N, 68.4° W, $\Lambda = 86^\circ$)와 Søndre Strømfjord(67.0° N, 50.9° W, $\Lambda = 74^\circ$)의 두 관측소이다. Thule Air Base 관측소는 극관내에 위치하고 있으며 Søndre Strømfjord 관측소는 오로라 발생 지역의 근방에 위치하고 있다. 두 관측소가 서로 다른 지자기 위도에 위치하므로 지자기 활동과 태양 활동 사이의 관계를 비교 연구하는데 유용하였다. 관측 기간 중에는 태양의 11년 주기에서 극대기와 극저기가 포함되어 있으며, 따라서 태양 활동에 대한 열권 온도의 변화를 정량적으로 분석하는 것이 가능하였다. 또한 장기간에 걸쳐 관측된 자료이기에 다양한 경우의 지자기 활동이 포함되었다. 한정된 태양 활동 기간에 측정된 자료를 이용하여 작성된 MSIS-86 모델 및 VSH 모델과 장기간에 걸쳐 관측된 온도와의 비교는 이 모델들의 유용성과 한계성을 인식하는데 도움이 되었다. 본 연구에서 밝혀진 고위도 열권 상부의 온도 변화는 다음과 같은 특징을 가지고 있었다.

(1) Thule 지역의 관측 온도 자료에서는 태양 활동에 따른 온도 증가율과 이에 따른 상관관계가 $3 \leq Kp \leq 4$ 에서 가장 높게 나타나고 있으며, $5 \leq Kp \leq 9$ 인 경우에는 방향에 따라 상이한 값들을 보였다. 반면에 Søndre Strømfjord 지역은 Kp 지수가 증가함에 따라 상관 관계와 온도 증가율이 다 같이 증가되고 방향에 따라서도 일정하게 나타났다. 그리고 태양 활동에 의한 온도 증가율이 상대적으로 위도가 낮은 Søndre Strømfjord 지역이 Thule 지역보다 더 크게 나타났다. 지자기 활동에 의해 주로 영향을 받는 절편 온도(a)는 전반적으로 Thule 지역이 높았다. 이 같은 경향은 Søndre Strømfjord이 지

리적 위도가 낮아 태양 에너지의 입사량이 Thule 지역보다 더 많기 때문에 태양 활동에 더 높게 의존하는 것으로 생각된다. 그러나 좀더 고위도에 위치한 Thule 지역은 태양 활동과 지자기 활동 중에서 지자기 활동에 의한 온도 상승이 좀 더 효과적으로 온도에 영향을 준다고 생각된다.

(2) 겨울철에 Thule 지역의 하루 동안의 온도 변화는 일일 주기(24 hrs)의 변화가 주된 양상을 띄며 일반적으로 17 ~ 18 UT(13 ~ 14 LT) 부근에 최대 온도가 나타난다. 그러나 태양 활동이 미약한 경우에는 반일 주기(12 hrs) 변화가 주된 양상을 이룬다. 이와 같이 태양 활동이 증가됨에 따라 일주 변화가 주된 양상을 띄는 것은 태양 극자외선 에너지에 의한 가열이 일주 변화에 큰 영향을 주기 때문이라 생각된다. 또한 열권 온도의 반일주 진폭은 태양 활동에 관계없이 어느 정도 일정한 값을 유지하는데, 이는 열권 온도의 반일주 변화가 태양 활동이 아닌 다른 에너지원이 존재하여 밤시간대에 온도를 상승시켜 생기는 것으로 보인다. 반일주 변화를 발생케 하는 밤시간대의 에너지원은 극지방에 광범위하게 일어나는 두 개의 세포 순환 운동 (two cell circulation)에 의해 낮과 저녁 시간대의 따뜻한 공기가 진입하기 때문이라고 생각된다 (Killeen *et al.* 1991). 이밖에도 태양 활동과 지자기 활동이 결합하면서 발생하는 여러 가지 물리적 작용에 의한 에너지원이 존재하리라 생각된다. 한편 지자기 활동과 태양 활동이 모두 강한($200 \leq F10.7 \leq 400$, $5 \leq Kp \leq 9$) 경우에는 최대 온도(약 2200K)가 22 UT 부근에서 나타나고 있으며 03 ~ 22 UT 사이에 급격한 온도 증가를 보이고 있다. 시간에 따른 이러한 온도의 변화는 같은 조건에서 VSH 모델에 의해 계산된 전자 밀도의 시간에 따른 변화와 큰 유사성을 보이고 있다. 이는 증가된 전자 밀도가 많은 양의 전류를 흐르게 하여 결과적으로 주울 열을 증가시킨다는 논리를 지지한다.

(3) 태양 활동에 따른 온도의 변화에서 모델과의 온도차는 태양 활동이 증가됨에 따라 커지며 최대 약 300 K 정도의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 모델 구성시 태양 활동이 강할 때의 관측 자료를 충분히 포함시키지 못했기에 생기는 것으로 보인다. 또한 모델에 의해 계산된 시간에 따른 온도의 변화는 관측에 의한 것보다 약하게 나타나고 있다. 더구나 관측값에서는 존재하던 반일주 변화가 모델에서는 보이지 않았다. 이와 같은 모델의 부정확성은 인공 위성 궤도의 장기 예측에 상당한 오류를 초래할 것이기에, 새로운 열권 경험 모델의 구축이 시급히 필요하다 하겠다.

감사의 글: 이 논문은 과학재단 목적기초연구비 (과제번호 96-0702-03-01-3)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Hedin, A. E. 1987, MSIS-86 Thermospheric model, *J. Geophys. Res.*, 92, 4649
- Killeen, T. L., McCormac, F. G., Burns, A. G. & Roble, R. G. 1991, Thermospheric dynamics, energetics, and composition at auroral latitudes, *Auroral Physics*, ed. by C.-I. Meng, M. J. Rycroft, L. A. Frank (Cambridge Univ. Press: Cambridge), p.69
- Killeen, T. L., Won, Y.-I., Niciejewski, R. J. & Burns, A. G. 1995, *J. Geophys. Res.*, 100, 21327

- McCormac, F. G., Killeen, T. L., Burns, A. G., Meriwether Jr., J. W., Roble, R. G., Wharton, L. E. & Spencer, N. W. 1988, *J. Geophys. Res.*, 93, 7466
- Rees, D. & Fuller-Rowell, T. J. 1991, Thermospheric response and feedback to auroral inputs, *Auroral Physics*, p51. ed. by C.-I. Meng, M. J. Rycroft, L. A. Frank (Cambridge Univ. Press: Cambridge)
- Rees, M. H. 1989, *Physics and chemistry of the upper atmosphere* (Cambridge Univ. Press: Cambridge)
- Won, Y.-I. 1994, *Studies of Thermospheric Neutral Winds utilizing Ground-Based Optical and Radar Measurements*, Ph. D thesis (Univ. of Michigan: Ann Arbor)