

TSPE16090-031-5

극지 고층대기광 및
남북극 유성레이더 자료의 비교 분석



2017. 1.

충남대학교 천문우주과학과

제 출 문

한국해양연구원 부설 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 고층대기광 및 남북극 유성레이다 자료의 비교 분석”과제의 위탁과제 “극지 고층대기광 및 남북극 유성레이다 자료의 비교 분석”의 최종보고서로 제출합니다.

2017 . 1 .

총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : 충남대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 김 용 하

참 여 연 구 원 : Sunkara Eswaraiah

참 여 연 구 원 : Nicholas Ssessanga

참 여 연 구 원 : 김 정 헌

참 여 연 구 원 : 감 호 식

참 여 연 구 원 : 김 은 솔

참 여 연 구 원 : 김 가 원

참 여 연 구 원 : 홍 준 석

참 여 연 구 원 : 조 은 별

요 약 문

I. 극지 고층대기광 및 남북극 유성레이다 자료의 비교 분석

북극 고층대기 온도를 추정하기 위해 OH 대기광(최대 방출 고도 87km)을 관측하는 Kiruna FTS 자료를 분석하고, 중간권 상부로 진입하는 유성 관측을 하는 Kiruna Esrance 유성레이다 자료를 2003년부터 현재까지의 장기적 자료를 확보하였다. 직접적인 온도 관측에 제한이 많은 고층대기 영역을 지상 관측 자료로부터 결정하는 분석 기법 개발하였다. 또한 남극 세종기지 유성레이다 자료를 활용하여 대기로 진입하는 유성의 물리·역학적 변화가 대기에 의해 영향을 받는 성질들을 연구하여 유성 레이다 자료 활용의 이해도를 높였다.

II. 연구개발의 목적 및 필요성

첫 번째 목적은 북극 Kiruna FTS 및 Esrance 유성레이다의 자료 분석으로 북극 고층대기 온도 변화 추세를 알아보는데 있다. 특히 북극 대기 순환 패턴의 고층 대기 영향을 남·북극 자료를 활용하여 회전류 (polar vortex) 및 대기 중량파 영향과 비교 분석할 수 있는 연구가 가능하다. 또한 현재 북극 저층대기에서 큰 화두로 떠오르는 해빙감소와 같은 지구 온난화와 관련지어 북극권의 고층대기 특성 연구의 필요성에 근거한다.

두 번째 목적은 남북극 유성레이다 자료를 확보하고, 이를 일관되게 분석하는 기법을 개발하여 세종기지 유성레이다 자료의 활용도를 높이는데 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

북극 Kiruna FTS와 Esrance 유성 레이다의 장기적 자료 확보를 통해 OH 대기광으로 추정한 온도 자료와 유성 레이다로 추정한 온도 자료를 위성 자료와 함께 비교 분석함으로써 북극 고층대기 온도 추세 변화 연구를 수행한다. 또한 천문 관측 기기인 SDSS 스펙트럼 자료로부터 OH 대기광 온도를 추출하는 연구를 수행한다. 이에 따라 대기광 온도 및 세기의 일변화, 계절변화, 연변화를 분석한다.

남극 세종기지 유성레이다 자료를 활용하여 대기로 진입하는 유성에 대한 물리·역학적 특성을 시뮬레이션 결과를 통해 알아봄으로써 중간권 상부의 배경대기를 통해 영향을 받는 유성을 관측하는 유성레이다 자료의 이해도를 높인다.

IV. 연구개발결과

본 연구에서 Kiruna (67°N, 21°E) 북극권 중간권 온도의 태양 활동에 대한 반응과 장기적 변화 추세 (2003년 11월 ~ 2014년 2월)를 푸리에 변환 분광기로부터 관측한 OH 대기광 온도를 사용하여 분석하였다. 그 결과 중간권의 겨울철 온도는 1월에 최저온을 보이며, 성층권 돌연 승온의 영향을 받음을 확인했다. 태양 활동에 대한 영향으로 Kiruna 중간권 온도가 5.0 +/-1.5 K/100SFU 변화하고, 이 효과를 제거했을 때 장기적 온도 추세는 -2.6 +/- 1.5 K/decade 의 냉각 추세를 발견하였다. 이 결과는 고위도 지역에서 태양활동 영향과 냉각 추세가 저위도에 비해 두드러짐을 시사한다.

또한 Kiruna (67N, 20E)의 Esrangle 유성레이다 자료를 Bath 대학으로부터 확보하여 중간권계면 부근의 장기간 온도 변화에 대한 연구를 수행하고 있다. 향후 세종기지 유성레이다 자료와 함께 장기간 온도 변화 추세를 비교함으로써 남·북극 중간권 상부 온도 추세와 유성레이다 자료로부터 얻을 수 있는 온도 추정 방법을 수립하였다.

남극 세종기지 유성레이다를 통해 지구 대기로 진입하는 유성의 물리적 특성 변화를 시뮬레이션으로 연구하였다. 그 결과 계절에 따른 대기 밀도의 변화가 유성 관측 고도에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

북극 Kiruna 지역에 설치된 Esrangle 유성레이다 자료를 본 연구들 통해 확보함으로써, 남극 세종기지에 설치된 유성레이다의 자료화 함께 활용할 계획이다. 특히 Esrangle 유성레이다와 남극 세종기지 유성레이더의 장기적으로 축적된 자료를 활용한 연구는 남·북극 고층대기의 온도 변화 추세 비교 및 중간권 상부의 다양한 역학적 특성을 비교할 수 있을 것이다. 이는 남·북극 고층대기의 차이점과 공통점을 살펴볼 수 있을 것이며, 각 극지방에서의 저층대기 상태와 관련성을 추적하는데 도움이 될 것이다. 특히 중간권 온도, 바람장, 파동 현상 등은 저층 대기의 상태와 관련성을 추적하는데 필수적으로 사용될 수 있으며, 자료 분석 기법을 독립적인 장비에 대해 적용하여 유성 레이다 자료 활용도를 높이는 기여를 할 수 있을 것이다.

Summary

We have analyzed the response of solar activity and long-term trends of Arctic mesopause temperature at Kiruna (67°N, 21°E), using data measured by Fourier Transform Spectroscopy (FTS) during a period of Nov. 2003 - Feb. 2014. The measured temperature near the mesopause showed the lowest temperature in January and signals of sudden stratospheric warming (SSW). The solar responses are estimated to be 5.0 ± 1.5 K/100SFU. After removing the solar responses, the long-term trends are found to be -2.6 ± 1.5 K/decade over Kiruna. Our results indicate significant cooling trend and solar response at high latitudes than low latitudes.

Meteor radar data measured at Kiruna Esrange were obtained from Bath University to study the long term change in the mesospheric temperatures. We establish the temperature estimation method obtained from the meteor radar and the mesospheric long-term trends of the Southern and Northern polar regions by comparing long-term observation with the Antarctic King Sejong Station (KSS) meteor radar.

In addition, we studied the physical characteristics of the meteoroid entering the Earth's atmosphere using simulations. As a result, it was confirmed that seasonal changes in atmospheric density have a great effect on the altitude of meteor observations.

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과	2
제 1 절 - OH 대기광 관측 자료 분석	2
1. OH 대기광	2
1.1 OH 대기광 층	2
1.2 마이넬 띠 (Meinel bands)	3
1.3 OH 회전 온도의 계산	3
2. 관측장비	5
2.1 푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectroscopy)	5
2.2 Sloan Digital Sky Survey (SDSS)	7
2.3 Microwave Limb Sounder (MLS)	10
3. 자료 분석	11
4. 결과 및 토의	16
4.1 Kiruna 지역 겨울철 중간권 온도의 변화	16
4.2 SDSS 온도의 계절 변화	18
4.3 태양 활동에 의한 영향	21
4.4 중간권 온도의 장기 변화 추세	24
제 2 절 - 유성 레이더 관측 자료 분석	26
1. Esrangle 유성레이더 관측 자료 분석	26
1.1 관측 장비	26
1.2 자료 분석	27
1.3 결과 및 토의	34
2. 남극 세종기지 유성레이더 관측 자료 분석	36
2.1 관측 장비	36
2.2 자료 분석	40
2.3 결과 및 토의	45
제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	52
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	54
제 5 장 참고문헌	55

제 1 장 서론

중간권은 지구 대기권에서 고도 약 50-90km 사이의 구간이다. 중간권 영역의 다양한 특성들은 대류권과 성층권으로부터 전파되어 올라오는 파동 현상이 증폭되는 영역이기도 하며, 태양 활동과 같은 우주 환경으로부터의 영향을 모두 받는 변동이 심한 영역이다. 직접적으로 관측하기에 한계가 큰 중간권 영역 관측은 지상 관측과 위성 관측을 통해 간접적 관측 연구가 이뤄지고 있다. 특히 지상 관측 장비인 라이다(Lidar)는 대기 중으로 특정 진동수의 레이저 광선을 발사하여 대기 중에 존재하는 원소들에 의해 반사된 빛을 이용하여 온도를 측정한다. 그리고 고도 약 87km은 OH 대기광이 최대 방출되는 고도인데, OH 대기광을 관측하며 대기광 회전 방출선의 세기로부터 중간권 온도를 추정할 수 있다. 또 지상 관측 장비인 유성레이다(Meteor radar)는 중간권계면 지역에서 빈번하게 관측되는 유성들의 유성흔에 의해 반사되는 전파로부터 측정된 유성 소멸시간을 사용한 방법과 고도에 따른 유성 개수 분포의 전치반폭과 온도와의 상관관계를 통해서 온도를 추정할 수 있다. Microwave Limb Sounder(MLS), The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry(SABER) 등과 같은 위성 탑재체들은 지구 대기의 가장자리(Limb)에서 다양한 파장의 복사를 관측하여 다양한 고도의 온도 프로파일(Profile)을 제공한다. 중간권 지역의 온도는 다양한 원인에 의해 변한다. 많은 연구들에서 태양 활동과 중간권 지역의 온도 사이의 양의 상관관계가 보고되었다. 이러한 연구들의 결과는 Beig, 2011에 잘 요약되어 있다. 또한 대기 중의 CO_2 농도가 증가하는 것은 중간권 지역에서 냉각 현상을 유발할 수 있다(Berger and Dameris, 1993, Portmann et al., 1995, Akmaev and Fomichev, 1998, 2000). 대기 중 오존량(Akmaev et al., 2006, Berger and Lübken, 2015)이나, 중량파(Gravity wave)의 변동(Hoffmann et al., 2011, Jacobi, 2014) 그리고 엘니뇨와 같은 대류권의 기후 변화(Nath and Sridharan., 2014)가 중간권 온도에 영향을 끼칠 수 있다. 그러므로 중간권 지역에서 온도의 장기적 변화 추세를 연구하는 것은 지구 대기의 하층과 상층에서 일어나는 현상들을 연계하는 데 있어 중요한 의미가 있다.

본 연구에서는 북극 Kiruna에서 관측한 OH 대기광으로부터 추정된 중간권계면 온도와 유성 레이다로 관측한 에코 정보로부터 추정된 중간권 온도와 MLS 위성 온도 자료를 비교하여 장기적 온도 추세를 알아보았다.

또한 남극 세종과학기지 유성 레이다 자료를 분석하여 대기로 진입하는 관측된 유성의 물리적 특성을 시뮬레이션을 통해 초기 진입 시의 특성을 유추하여 중간권 배경 대기와 진입하는 유성과의 상호 작용을 알아봄으로써 유성 레이다 자료의 분석 기법의 확장 및 활용도를 높였다.

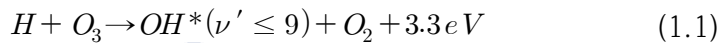
제 2 장 연구 수행내용 및 결과

제 1 절 OH 대기광 관측 자료 분석

1. OH 대기광

1.1 OH 대기광 층

중간권계면 지역에는 OH의 층이 존재한다. 이 OH 층은 밤 시간에 최대가 되며 고도 약 87 ± 3 km의 중심 고도로부터 상하 약 5-8km 정도의 두께를 보인다(Baker and Stair, 1988). 이 층에서 진동적으로 들뜬 OH 라디칼들은 H와 O_3 의 다음 반응에 의해 생성된다.



또한 위와 같이 생성된 OH 라디칼들은 아래의 반응에 의해 소멸된다.



OH 라디칼들이 생성/소멸되는 정도는 OH 대기광의 세기와 직결된다. 낮 시간 동안에 오존은 태양의 극자외선에 의해 O_2 와 O로 광해리(Photodissociation)된다. OH 라디칼의 생성에 결정적인 역할을 하는 O_3 는 밤 시간 동안 세 개의 산소 원자의 재결합으로 생성되며 수소와의 상호작용으로 파괴된다.

$$[O_3] = \frac{k_{O+O_2+M}[O][O_2][M]}{k_{H+O_3}[H]} \quad (1.3)$$

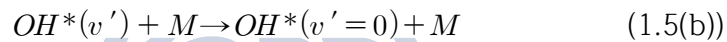
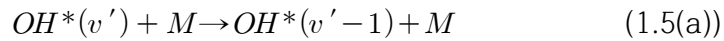
또한 식 (1.1)에서와 같이 OH라디칼들은 O_3 와 H의 반응으로 생성되므로, OH 라디칼들의 생성율은

$$P_{OH^*} = k_{H+O_3}[H][O_3] \quad (1.4)$$

이며 이 식에 위 식 (1.3)의 O_3 생성율을 대입하면 OH 라디칼의 생성율이 산소 원자의 수에 직접적으로 비례한다는 것을 알 수 있다. O_3 의 재결합은 태양 복사가 사라지기 시작하면 빠른 속도로 시작되므로, OH 라디칼들의 대기광 방출이 저녁 시간에 최대를 이루기도 한다.

1.2 마이넬 띠(Meinel bands)

마이넬 띠는 A.B Meinel이 1950년에 발견한 수산기 라디칼 진동-회전 방출선들의 띠이다(Meinel, 1950). 식 (1.1)에 의해서 생성되는 OH^* 의 진동 준위는 6부터 9 사이이다. 이렇게 진동적으로 들뜬 OH 라디칼들의 전자는 하위 진동 에너지 준위를 향해 계단식으로 천이하며 복사를 방출한다. 또한 다음과 같이 다른 대기 분자들과의 충돌에 의해서도 낮은 에너지 준위로 천이할 수 있다(Sivjee, 1992).



여기서 M은 O_2 , N_2 혹은 산소 원자이다. 식(2.35(a))는 계단식 천이를 의미하며, 식(1.5(b))는 한 번에 진동 에너지 준위의 바닥상태까지 천이하는 경우이다.

마이넬 띠를 구성하는 OH 대기광 방출선들의 이름은 다음 식 (1.6과 같은 방식으로 명명된다.

$$OH(\nu' - \nu'') \Delta J_i(L'')_{\Lambda''} \quad (1.6)$$

위 식의 ' 과 '' 은 각각 천이가 일어나기 전과 후의 상태를 나타낸다. 여기서 ν 는 천이가 일어나는 진동 에너지 준위들의 진동 양자수이다. 또한 L은 궤도 양자수이며, i는 OH 분자의 바닥 상태가 가질 수 있는 두 가지 각운동량을 나타내 주는 지표이다. i가 1인 경우는 ${}^2\Pi_{\frac{3}{2}}$ 상태를, 2일 경우는 ${}^2\Pi_{\frac{1}{2}}$ 상태를 각각 나타낸다. J는 회전 양자수이며 위 2.3.3절에서 언급한 것과 같이 각 방출선 가지의 이름은 J의 변화량을 통해 P, Q, R과 같이 붙여진다. Λ 는 회전 방출선들의 doublet을 나타낸다.

1.3 OH 회전 온도의 계산

중간권계면 지역에 존재하는 분자들은 평균적으로 약 6.6×10^{-5} 초 마다 한 번씩 충돌하고 OH 라디칼들은 약 4-6 ms(milli-second) 의 시간 후에 전자가 낮은 에너지 준

위 상태로 다시 되돌아가며 빛을 방출한다. 이것은 1 ms당 약 15번의 충돌을 의미하고, OH 라디칼들의 수명을 고려하였을 때 OH 라디칼들은 그들의 전자가 다시 낮은 에너지 준위로 천이하기 전에 약 75번의 충돌을 경험한다고 할 수 있다.(Won et al., 1999) 그러므로 중간권계면 OH 라디칼들의 회전 준위의 분포가 볼츠만 분포(Boltzmann distribution)를 한다고 가정할 수 있다(Won et al., 1999). 또한 OH 대기광 층의 빛은 대부분 약 87km 고도 근처에 위치하는 중심 고도로부터 방출되므로, 회전 온도(Rotational temperature)는 고도 87km 지역 중성 대기의 온도를 대표하는 값으로 사용될 수 있다.

대기광 방출선 세기의 비율과 중간권계면 지역의 온도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다(Phillips et al., 2004).

$$T = (hc/k)(F_b - F_a) / \ln \left[\frac{I_a A_b (2J_b' + 1)}{I_b A_a (2J_a' + 1)} \right] \quad (1.7)$$

서로 다른 상위 에너지 준위로부터 발생하는 두 회전 방출선 a 와 b 에 대하여, J_a' , J_b' 은 각각 두 회전선의 총 각운동량 양자수이고 A_a , A_b 는 각각 a 와 b 회전선에 해당하는 에너지 준위 사이에서 전자의 자발적 천이가 일어날 확률을 나타내 주는 아인슈타인 계수이다. I_a 그리고 I_b 는 각각 측정된 a, b 방출선의 세기이다. F_a 와 F_b 는 각각의 상위 에너지 준위에서의 항값들이다. 또한 h 는 플랑크 상수, c 는 광속, k 는 볼츠만 상수이다.

극지연구소

2. 관측 장비

2.1 푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectroscopy, FTS)

푸리에 변환 분광기는 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)로 측정된 간섭도(Interferogram)에 대해 역 푸리에 변환을 수행하여 대기의 스펙트럼을 측정하는 기기이다. 그림 1.1은 푸리에 변환 분광기의 구조를 간단하게 나타낸 것이다. 간섭도를 얻는 역할을 하는 마이켈슨 간섭계는 크게 두 개의 거울과 그 중심부의 반투명 거울(Beam splitter)로 구성된다. 간섭계의 중심에 위치한 반투명 거울은 간섭계에 입사한 빛을 투과시키거나 반사시켜 광로차를 만든다. 두 빛 사이의 광로차가 파장의 정수 배의 값을 가지는 경우에는 보강간섭, 반정수 배의 값을 가지는 경우에는 상쇄 간섭이 일어난다. 양 옆의 두 거울 중 하나의 위치를 주기적으로 변화시키면 검출기로 측정되는 복사의 세기가 주기적으로 변하는 것을 알 수 있다.

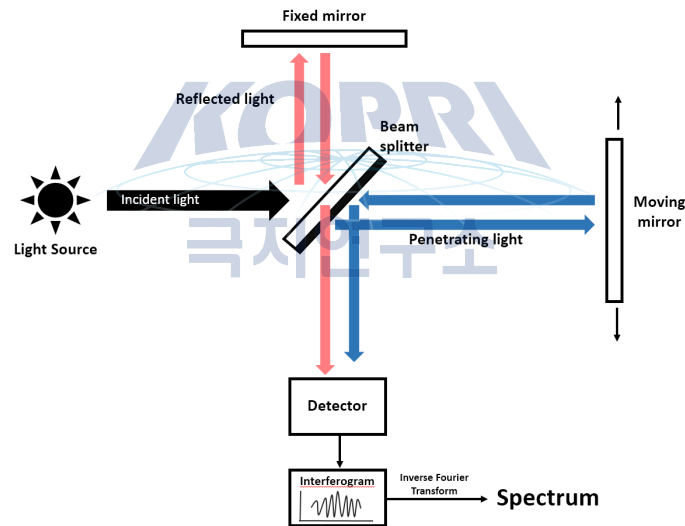


그림 1.1 푸리에 변환 분광기의 구성도,

이렇게 시간에 따라 변동하는 복사 세기의 함수가 바로 간섭도이다. 푸리에 변환 분광기에서 스펙트럼을 얻는 원리는 다음과 같다(Won et al., 1999). 파수(Wavenumber) $\sigma = \frac{1}{\lambda}$, 진폭이 각각 a_1, a_2 이며 서로 간의 광로차가 x 인 두 광선을 중첩시켜 얻을 수 있는 진폭 A 는 다음과 같다.

$$A = a_1 + a_2 e^{2\pi i \sigma x} \quad (1.8)$$

위 식의 $2\pi\sigma x$ 는 두 광선의 위상차를 나타내며, δ 로 표시한다. 또한 측정되는 복사의 세기

I는 위의 진폭과 그 켈레복소수의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$I = AA^* = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta \quad (1.9)$$

마이켈슨 간섭계에서는 동일한 빛에 대해 광로차를 생성하므로, a_1 과 a_2 는 동일하다. 이 경우

$$I_0(\chi) = 2a^2[1 + \cos(\delta)] = I_{av}[1 + \cos(2\pi\sigma\chi)] \quad (1.10)$$

가 된다. 광로차 x 를 조절함에 따라 감지기에서 감지되는 복사의 세기는 최저 0부터 최대 $2I_{av}$ 까지 변한다.

단색광의 경우가 아닌 광원으로부터 $L(\sigma)$ 의 복사가 방출될 때, σ 부터 $\sigma+d\sigma$ 까지의 범위 내에서 감지기에 도달하는 평균 복사량은 $L(\sigma)d\sigma$ 이며 기기가 파장에 대해 반응하는 정도를 나타내는 $B(\sigma)$ 에 비례한다. $L(\sigma)$ 와 $B(\sigma)$ 의 곱을 $L'(\sigma)$ 라고 하면 위 식 (1.10)에서의 복사 세기는 다음과 같이 변한다.

$$\begin{aligned} I_\sigma &= \int_0^\infty L'(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\chi)]d\sigma \\ &= \int_0^\infty L'(\sigma)d\sigma + \int_0^\infty L'(\sigma)\cos(2\pi\sigma\chi)d\sigma \quad (1.11) \\ &= \bar{I} + \int_0^\infty L'(\sigma)\cos(2\pi\sigma\chi)d\sigma \end{aligned}$$

이 때 σ 가 음수인 경우 $L'(\sigma)$ 는 0이 되므로, 적분 범위를 $-\infty$ 부터 ∞ 까지로 할 수 있다. 또한 $I_\sigma(\delta) - I_{av}$ 를 $I'_\sigma(\delta)$ 로 바꾸면 위 식은

$$I'_\sigma(\chi) = \int_{-\infty}^\infty L'(\sigma)\cos(2\pi\sigma\chi)d\sigma \quad (1.12)$$

가 된다. 여기서 표준화된 간섭도 $I'_\sigma(\delta)$ 는 $B(\sigma)$ 의 코사인 변환 꼴이라고 할 수 있으므로 광원의 복사 스펙트럼은 간섭도에 대해 식 (1.13)와 같이 역 코사인 변환을 수행하면 얻을 수 있다.

$$L'(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I'(\chi) \cos(2\pi\sigma\chi) d\chi \quad (1.13)$$

FTS를 이용한 OH 대기광 관측에서는 이렇게 얻은 적외선 스펙트럼으로부터 OH Meinel band의 방출선 세기를 구하고 그들의 비율을 이용해 약 87km 상공의 온도를 측정한다. Kiruna FTS에서 OH 회전 온도 측정에는 Meinel OH(3-1) P_1 방출선들이 사용되었다. Meinel OH(3-1) P_1 방출선들의 특성들은 표 1.1에 요약되어 있다(Won et al., 1999).

표 1.1 OH(3-1) P-branch 방출선 (Won et al., 1999).

wavenumber (cm^{-1})	peak identification	upper rotational state	total upper angular momentum
6561.5	$P_1(2)$	1	1.5
6522.3	$P_1(3)$	2	2.5
6480.3	$P_1(4)$	3	3.5
6435.2	$P_1(5)$	4	4.5

2.2 Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

Sloan Digital Sky Survey(SDSS)는 각종 천체들의 이미지와 스펙트럼을 측정함으로써 우주의 3D 지도를 만들기 위한 프로젝트이다. SDSS는 미국 New Mexico 주의 Apache Point Observatory(APO, 32°N 105°W)에서 2.5m 망원경을 사용하여 2000년 4월에 본격적인 관측을 시작하였다. SDSS 스펙트럼은 이 프로젝트에 의하여 측정되었다.

SDSS는 스펙트럼을 얻기 위하여 알루미늄 건판(Plate)과 광섬유(Light fiber)들을 이용한다. 측광이 이루어지는 과정은 다음과 같다. 먼저 관측 대상들을 선정한 후, 건판에 관측 대상들의 위치에 맞추어 구멍을 낸다. 그 후 각 구멍마다 하나씩의 광섬유를 연결하여 대상으로부터 방출되어 입사한 빛을 감지기(detector)까지 전달한다. 또한 SDSS 스펙트럼 관측은 원래 천체를 관측하는 목적으로 수행되었으므로, 하루에 수행되는 관측 횟수가 대략 5회 이하로 적으며 노출 시간이 상대적으로 길게 나타나는 특징이 있다.



그림 1.2 SDSS 분광기의 플러그 플레이트 (Plugplate).
 (사진출처: http://classic.sdss.org/gallery/gal_photos.html)

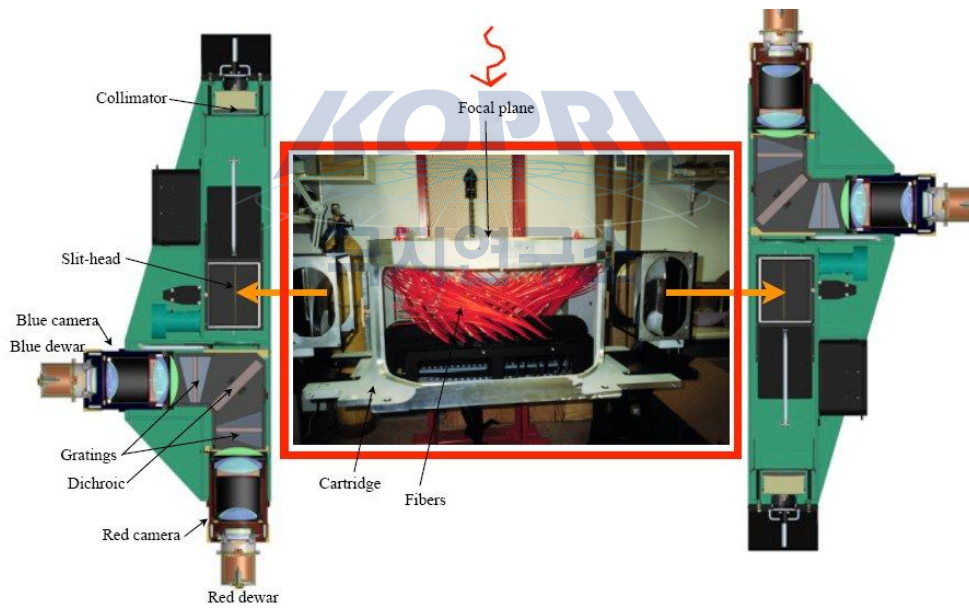


그림 1.3 BOSS 분광기.
 (사진출처: <http://www.sdss3.org/instruments/boosspectrograph.php>)

2000년부터 2008년까지의 스펙트럼 측정에 사용된 SDSS- I / II 분광기(Spectrograph)에 사용된 광섬유의 직경은 약 3" 이다. 또한 측정하는 스펙트럼 파장의 범위는 3800 Å -9200Å까지이고 두 대의 분광기를 동시에 사용하여 한 번의 관측 당 최대 640개 대상의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 천체 관측 시 지구의 배경 대기는 천체의 정확한 광량 측정에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 이러한 배경 대기의 영향을 제거하기 위하여 관측 때마다 최소 32개 이상의 배경 대기 스펙트럼을 측정한다. 표 1.2는 SDSS와 SDSS- I / II 분광기에 관한 정보이고 더 자세한 정보는 Stoughton et al. (2002)에서 얻을 수 있다.

표 1.2 SDSS I / II 분광기의 사양.

(출처: <http://classic.sdss.org/dr7/instruments/spectrographs/index.html>)

Spectrograph parameters

CCDs	4, 2048 × 2048, SiTe/Tektronix, 49.2mm square
Channels	3800-6150Å (blue), 5800-9200Å (red)
Number of fibers	320 × 2
Fiber diameter	3"
Wavelength calibration	Hg, Cd, and Ne arc lamps, rms error of 0.07 pixels (10 km/s)
Flat field	quartz lamps
Flux calibration	Standard stars in each field, tied to colors observed with the imaging camera
Pixel size	69 km/s
Spectral resolution	ranges from 1850 to 2200
Integration time	Exposures are taken until the cumulative mean S/N per pixel exceeds 4 for a fiducial fiber magnitude of g = 20.2 and i = 19.9, typically 3 exposures of 15 minutes each under good conditions.

2009년부터 2011년까지는 Baryon Oscillation Spectroscopic Survey(BOSS) 프로젝트가 수행되었다. 이 프로젝트 수행 기간 중인 2009년 여름에, SDSS spectrograph에 새로운 그레이팅(Grating), CCD 그리고 광섬유들을 장착하는 작업이 수행되었다. 그 결과, 동시에 측정 가능한 스펙트럼의 개수가 1000개로 증가하였다. 이렇게 업그레이드 된 BOSS 분광기는 SDSS- I / II 분광기와 동일한 측광 방식을 사용하지만, 광섬유의 직경이 3"에서 2"로 감소하였으며 측정하는 스펙트럼 파장 범위는 3600Å -10400Å으로 확장되었다. 그로 인해 배경 대기 스펙트럼의 개수도 증가하여 약 70개 이상의 배경 스펙트럼을 제공한다. 표 1.3은 BOSS 분광기에 관한 정보이고 더 자세한 정보는 Aihara et al. (2011)에 수록되어 있다.

표 1.3 BOSS 분광기의 사양.

(출처: http://www.sdss3.org/instruments/booss_spectrograph.php)

Main Parameter Summary

Number of spectrographs	2
Spectral resolution	1560-2270 in the blue channel, 1850-2650 in the red channel
Wavelength coverage	3600-10,400 Angstroms
Fiber diameter	2 arcsec
CCDs	4Kx4K fully-depleted LBNL CCDs with 15 micron pixels for the red side, blue-sensitive 4Kx4K e2V CCDs with 15 micron pixels for the blue side
Collimator coating reflectivity	>95% from 420 nm to 1000 nm

2.3 Microwave Limb Sounder (MLS)

Microwave Limb Sounder(MLS)는 NASA의 Aura 위성에 탑재된 탑재체이다. Aura 위성은 2004년 7월 15일에 발사되었고 같은 해 8월 13일부터 관측을 시작하였다. Aura 위성의 궤도 경사각은 약 98°이다. 그러므로 하루에 지구를 약 14바퀴 정도 공전한다. 또한 태양 동기 극 궤도(Sun-synchronous polar orbit)를 가지며 고도는 약 705km이다. MLS는 지구 대기의 가장자리에서 마이크로파 영역의 열 방출을 측정하여 대기 중에 존재하는 OH, BrO, 오존 등의 대기 구성 성분과 온도, 압력 그리고 얼음 입자들의 프로파일(Profile)을 제공한다.

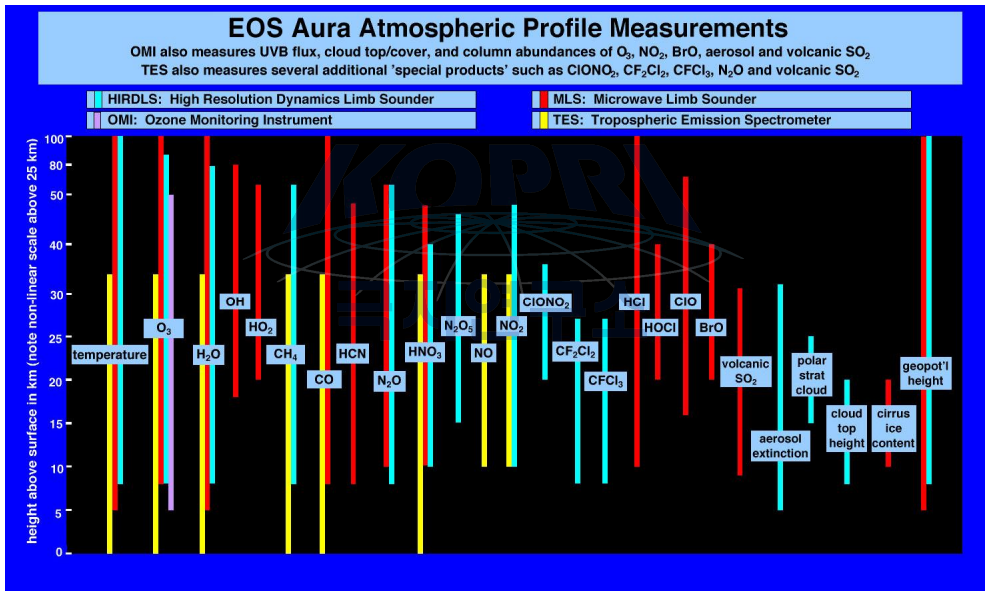


그림 1.4 MLS(붉은색 막대기)로 얻을 수 있는 고도 당 대기 파라미터.

3. 자료 분석

3.1 FTS 자료 분석

Kiruna(67.90°N, 21.10°E) 지역에서 운용하고 있는 극지연구소 FTS는 1 μ m-1.7 μ m 파장대역에서 최대 감도를 나타내는 InGaAs(Indium Gallium Arsenide) 적외선 검출기를 장착한 Bomem 사의 마이켈슨 간섭계를 사용한다(e.g. Won et al., 2001). 또한 1, 2,

4, 8, 16cm^{-1} 의 다섯 가지 분해능 중 하나를 선택하여 사용할 수 있으며 $5000\text{-}10,000\text{ cm}^{-1}$ (약 $10,000\text{-}20,000\text{ \AA}$) 범위에서 스펙트럼을 측정할 수 있다(e.g. Won et al., 2004). OH 대기광 스펙트럼 측정은 태양의 위치가 지표면 아래 4° 이하일 때, 천정 방향으로 이루어지며 5분 동안 얻은 50개의 간섭도를 모아 하나의 스펙트럼을 만든다. 그리고 백야 현상으로 인해 극지방에서 지상 OH 대기광 관측은 겨울 기간에만 가능하다. 논문에서는 2003년부터 2014년까지 매년 11월-2월에 측정된 Kiruna 지역 중간권 온도들 중 측정 오차가 본값의 5%가 넘지 않는 자료들을 사용하였다.

표 1.4 FTS 유효 자료 일수.

연도	관측가능일수
2003	30
2004	95
2005	99
2006	61
2007	39
2008	52
2009	68
2010	59
2011	80
2012	71
2013	60
총	723

3.2 SDSS 자료 분석

SDSS는 한 건판의 다양한 광섬유들에서 측정된 광량 정보를 fit 파일 형식으로 제공한다. SDSS 스펙트럼의 측정 대상은 퀘이사, 은하, 별 그리고 배경 대기를 포함하며 SDSS에서 제공하는 스펙트럼에는 측정된 대상의 분류(class)가 명시되어 있다. 우리는 본 분석에 앞서 분류가 sky 인 파일들을 선정하였다. 온도 계산에 사용할 방출선은 SDSS 스펙트럼의 관측 파장 범위를 고려하여 7340 \AA - 7410 \AA 사이에 존재하는 OH(8-3) P-branch의 방출선들로 결정하였다. OH(8-3) P-branch 방출선들의 특성은 아래 표 1.5에 요약되어 있다.

표 1.5 OH(8-3) P-branch 방출선.

Central Wavelength	Line	Upper Rotational State	Total Upper Angular Momentum
7343.4Å	$P_1(3)$	2	2.5
7370.5Å	$P_1(4)$	3	3.5
7404.6Å	$P_1(5)$	4	4.5

배경 대기 스펙트럼으로부터 온도를 계산할 때, 배경 대기가 아닌 다른 광량이 입사하는 경우, 방출선의 세기를 정확하게 측정할 수 없다. 이러한 영향들을 제거하고 정확한 방출선의 세기를 결정하기 위해 우리는 OH(8-3) P-branch 방출선 각각의 중심 파장에서 측정된 광량이 건판의 전체 광섬유에서 측정된 광량들의 평균의 4배를 초과하는 경우(그림 1.5의 붉은 삼각형) 분석에서 제외하였다.

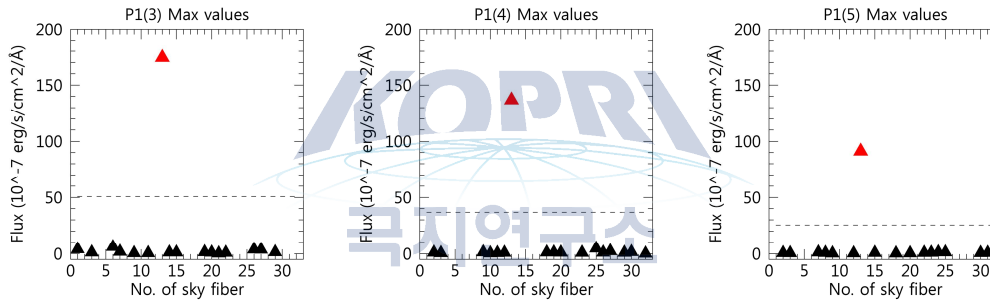


그림 1.5 Plate 0556의 P-branch lines의 세기 (점선: 평균세기).

다음으로 건판의 모든 광섬유들이 측정한 광량을 파장별로 통합하여 해당 건판에 대한 총 배경 대기 스펙트럼을 생성하였다. 이 때 총 배경 대기 스펙트럼은 각 파장 별로 더해진 총 광량을 더해진 광섬유의 수로 나눈 것으로 정의하였다. 그 후 온도 계산에 사용되는 방출선들이 포함된 영역인 7275Å-7410Å 범위의 스펙트럼만을 선택하였으며 이를 OH(8-3) P-branch 스펙트럼이라고 하였다. OH(8-3) P-branch 스펙트럼의 범위는 각 관측 별 파장 간격의 크기와 처음 그리고 끝 파장에 따라서 1Å-3Å 정도의 차이를 보인다. 그 다음으로 OH(8-3) P-branch 스펙트럼에 대해 기준선(Baseline)을 제거하는 작업을 수행하였다. 각 파장 별로 배경 광량이 다르기 때문에, 정확한 방출선 세기를 측정하기 위해서는 기준선 제거 작업이 필수적이다. 기준선은 OH(8-3) P-branch 스펙트럼에 대해 2차 피팅(fitting)을 수행하고, 그 결과값 이하의 값을 가지는 점들에 대해서만 2차 피팅을 다시 수행하는 과정을 반복적으로 수행하였다. 기준선은 이러한 피팅 작업을 세 번 반복하여 얻은 값들로 정의하였다. 그림 1.6의 붉은 실선들이 기준선에 해당하며 이렇게 구해진 기준선은 스펙트럼으로부터 제거되었다.

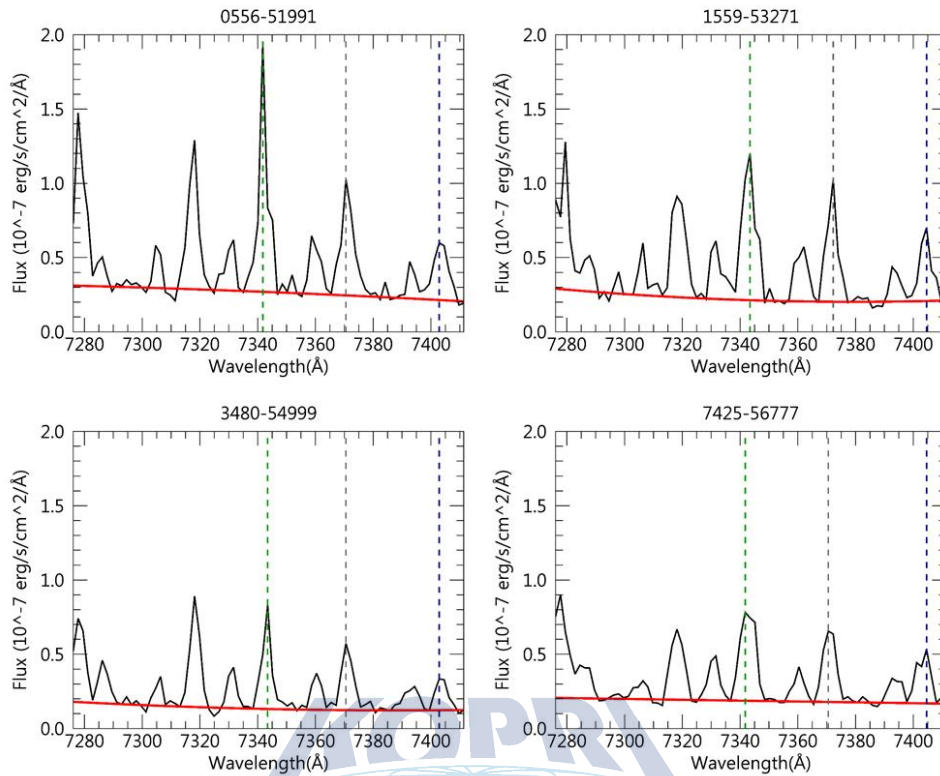


그림 1.6 OH(8-3) 스펙트럼과 피팅 추세선(빨간선) (녹색: $P_1(3)$, 회색: $P_1(4)$, 파란색: $P_1(5)$).

SDSS 측광의 특성상 각 관측 별로 파장 범위와 파장 간격의 크기 등이 다르기 때문에 방출선들의 중심 파장이 일정 범위 내에서 약간의 변동성을 보인다. 이것을 고려하여 각 방출선들의 중심 파장을 이론적인 중심 파장으로 특정하지 않고, 그로부터 $\pm 4\text{\AA}$ 이내에서 광량이 최대가 되는 파장으로 정하였다.

중심 파장을 결정한 후에는 각 방출선의 세기를 계산하였다. 각 방출선의 세기는 위에서 결정한 중심 파장으로부터 약 $\pm 3\text{\AA}$ 에 대하여 가우시안 피팅(gaussian fitting)을 수행한 후 중심 파장으로부터 약 $\pm 1.5\text{\AA}$ 에 해당하는 광량들을 모두 더하는 방법을 통하여 계산하였다. 그리고 이렇게 계산된 두 방출선 세기의 비율을 앞서 언급한 식 (2.36)에 대입하여 최종적으로 고도 약 87km 지역의 온도를 계산하였다.

OH(8-3) P-branch 방출선들에 해당하는 아인슈타인 계수들은 실험적으로 널리 알려져 있는데, 본 연구에서는 Langoff et al. (1986) 의 값을 사용하였다. 항값 역시 여러 방출선 띠들에 대해 다양한 실험 결과로써 보고되었으며 본 연구에서 사용된 항값은 Coxon and Foster. (1982) 의 값이다. OH(8-3) P-branch 방출선들을 사용하여 온도 계산을 수행하기 위하여 필요한 값들은 다음 표 1.6에 요약하였다.

표 1.6 회전온도를 계산하기 위해 사용된 P-branch 값.

$P_1(3)$		$P_1(4)$		$P_1(5)$	
Term	value	Term	value	Term	value
J_a'	2.5	J_a'	3.5	J_b'	4.5
A_a	0.225	A_a	0.247	A_b	0.263
F_a	24009.51	F_a	24093.34	F_b	24201.45

또한 최종적으로 온도 계산에 사용할 방출선 두 가지를 선택하기 위하여 무작위로 선정한 300개의 SDSS 스펙트럼들로 구성된 3개의 샘플 그룹에 대하여 $P_1(3)$, $P_1(4)$ 그리고 $P_1(5)$ 방출선을 사용하여 위와 같은 과정으로 온도 계산을 수행하였다(그림 1.7). 3가지의 샘플 그룹 모두에서 $P_1(3)$, $P_1(5)$ 방출선을 사용하여 계산한 온도가 상대적으로 가장 작은 표준편차를 보였다. 그러므로 이 두 방출선을 이후 온도 계산에 사용하였다.

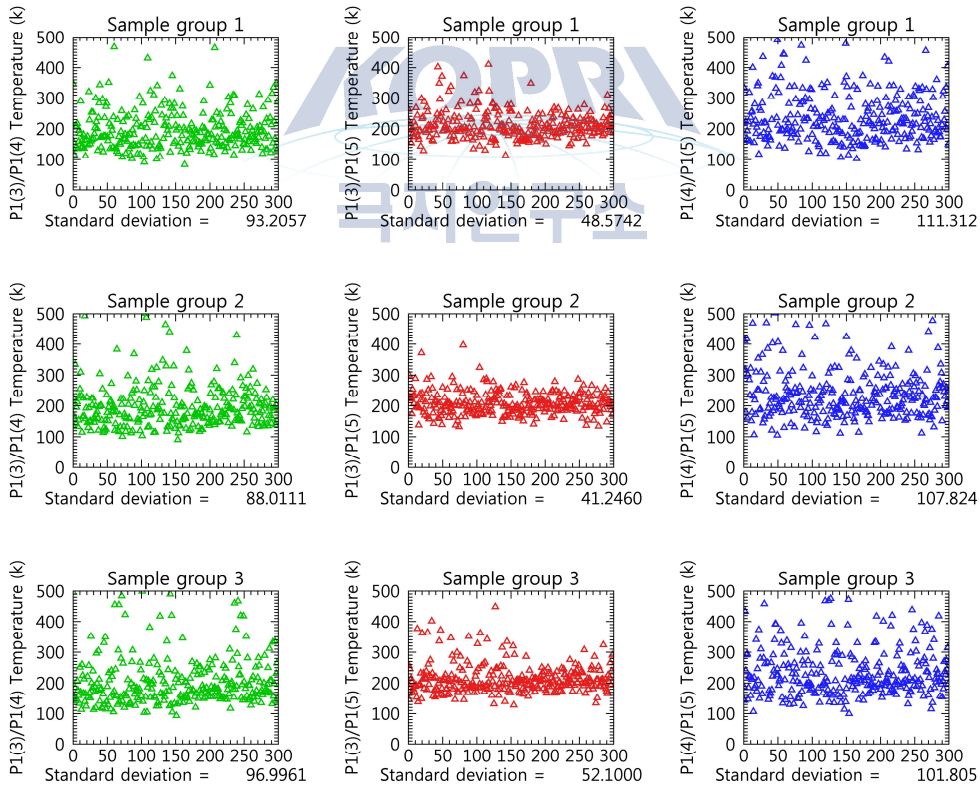


그림 1.7 OH(8-3)의 서로 다른 세 가지 샘플 그룹으로 추정된 온도와 그에 해당하는 표준편차.

본 연구에서는 2000-2015년 동안 측정된 SDSS 스펙트럼을 사용하였으며 각 연도 별 관측 가능일은 표 1.7에 표시되어 있다.

표 1.7 SDSS 유효 자료 일수.

연도	관측가능일수
2000	62
2001	96
2002	103
2003	112
2004	86
2005	76
2006	77
2007	77
2008	112
2009	92
2010	133
2011	158
2012	154
2013	138
2014	69
총	1545

매년 7-8월은 관측지의 날씨가 좋지 않기 때문에 관측을 수행하지 않고 망원경 유지/보수 작업을 하는 기간이므로 해당 기간의 온도는 측정되지 않았다.

4. 결과 및 토의

4.1 Kiruna 지역 겨울철 중간권 온도의 변화

그림 1.8은 Kiruna 지역에서 FTS로 측정된 온도와 MLS 위성이 위도 $68^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{N}$, 경도 $21^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{E}$ 지역을 지날 때 측정된 고도 0.00464hPa(약 88km) 온도의 시계열 그래프이다. 이 두 온도는 앞으로 각각 FTS 온도 그리고 Kiruna MLS 온도로 언급될 것이다. 그림의 가로축은 매년 11월 1일로부터 지난 날짜 수이고, 세로축은 온도를 나타낸다. FTS 일평균 온도와 Kiruna MLS 일평균 온도가 삼각형들로 나타내어졌으며 각각 청색과 적색에 해당한다. 또한 실선들은 각각 일평균 온도들의 9일 이동평균(Running average)이다. 그림 1.8 (l)은 두 온도의 계절 변화(Seasonal variation)를 나타내며 회색 점들은 조사 기간 전체에 걸쳐 측정된 FTS 일 평균 온도들을 모두 중첩시켜 그린 것이다. 계절 변화는 Holmen et al. (2014)에서 사용한 것과 같이 각 연도별로 같은 날의 일평균 온도들을 평균한 것의 9일 이동 평균으로 정의하였다. FTS 그리고 Kiruna MLS 온도의 계절 변화는 각각 그림 1.8 (l)의 청색과 적색 실선에 해당한다. FTS와 Kiruna MLS의 측정 결과를 비교하였을 때, 평균 상관계수 0.79 정도로 두 자료가 잘 일치하는 경향을 보였다.

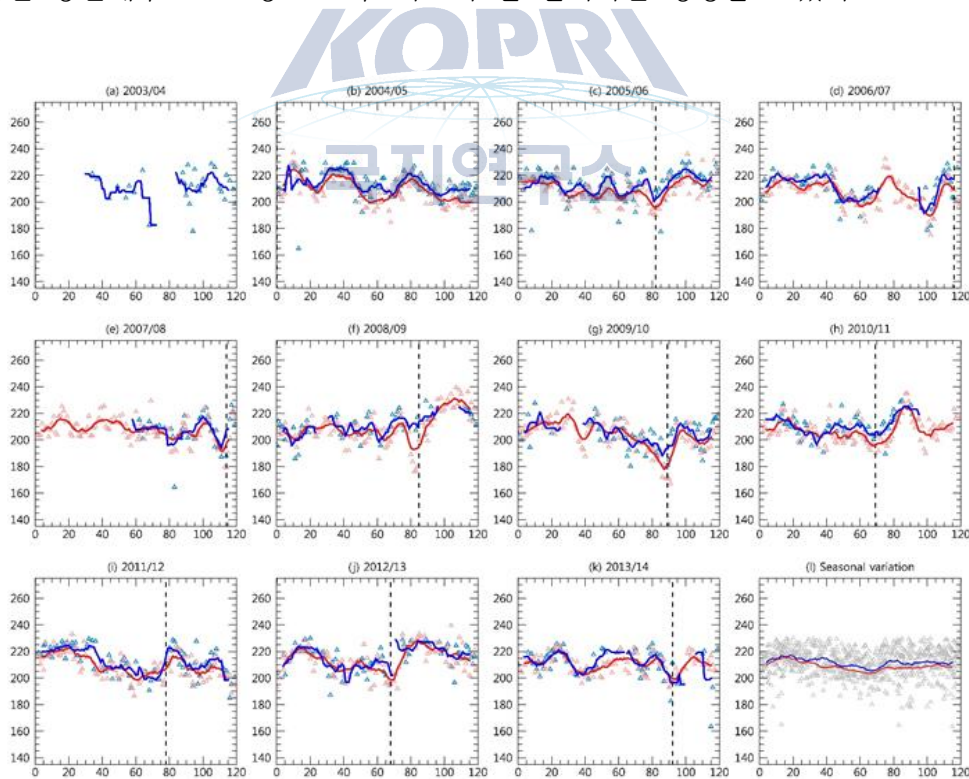


그림 1.8 2003/04년(a)부터 2013/14년(k)까지 FTS 온도 (파랑색)와 MLS 온도 (빨간색)의 시계열과 계절적 변화(l). (a-k)에서 검은 점선은 SSW이 발생한 날.

FTS와 Kiruna MLS 온도의 시계열에서 모두 1월에 최저 온도가 나타났으며 2월에 높은 온도를 보였다. 이는 두 온도의 계절 변화에서도 잘 확인할 수 있다. 또한 Hall et al., (2014)가 Svalbard 지역에서 관측한 OH 회전 온도의 계절 변화와도 일치한다.

이러한 1월의 저온 현상은 성층권 돌연승온 현상과 관련이 있다. 성층권 돌연승온의 중심일 전후에 중간권에서는 냉각 현상이 발생하며, 뒤따르는 복구 기간 동안 중간권의 온도는 평상시에 비해 급격하게 증가한다는 것은 앞서 다양한 연구 결과들에서 보고되었다. SSW의 중심일은 주로 12월-1월경에 분포하기 때문에 그에 선행하는 냉각 현상에 의해 본 연구의 결과와 같이 12월-1월의 온도가 일반적인 중간권의 상황보다 더욱 낮게 나타날 수 있다.

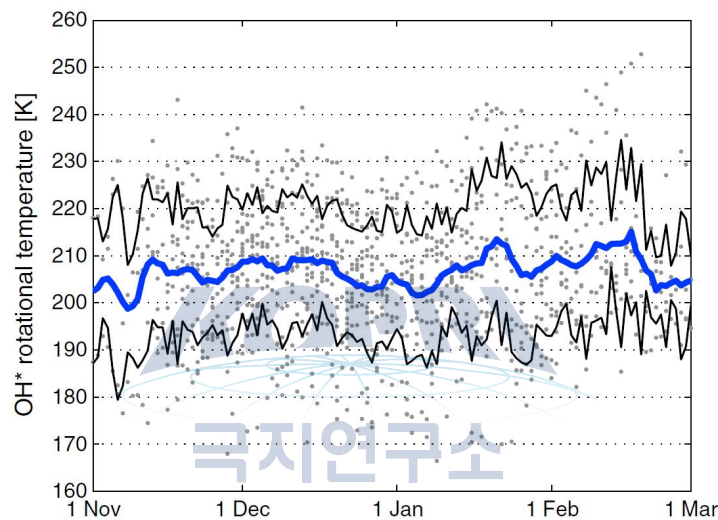


그림 1.9 롱이어비엔(Longyearbyen)에서의 연간 OH* 온도 (평균 OH* 온도 (회색 점), 5일 이동 평균(파란선), ±1 표준 편차(검은 실선)) (Holmen et al., 2014).

또한 주로 2월에 분포하는 복구 기간 동안 중간권계면 지역의 온도가 급격하게 증가하는 것은 2월의 평균 온도를 높이는 역할을 한다. 이러한 현상들은 그림 1.8의 연도별 시계열에서도 잘 나타난다. 특히 강한 성층권 돌연승온 현상이 일어났던 것으로 알려진 2009년, 2013년과 일어나지 않았던 2005년을 비교하면 그들 사이의 겨울철 온도 변화의 경향이 뚜렷한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

겨울철 극 지역에 존재하는 강한 저기압인 극 소용돌이(Polar vortex)의 세기는 성층권 돌연승온과 밀접한 관계를 보인다. SSW가 발생할 때, 극 소용돌이에 섭동이 생기며 그 세기는 약해지게 된다. 이러한 극 소용돌이의 세기를 나타내는 지수로는 북극 진동 지수(Artic Oscillation Index, AOI)가 있다. 북극 진동 지수는 월별 지수로서 제공되며, 2000년 1월부터 15년 동안의 북극진동 지수는 그림 1.10에 나타나 있다. 북극진동 지수는 FT S 월평균 온도와는 $1.12K \pm 0.6K/AOI$, Kiruna MLS 월평균 온도와는 $1.17K \pm 0.6K/AOI$ 의

양의 상관관계를 보였다. 이는 성층권 돌연승온의 중심일 주변에서 극 소용돌이의 세기가 약해지며 중간권에서 냉각이 일어나는 현상과 일치하는 경향을 보이며, 복구 기간의 중간권 온도 상승과도 일치한다.

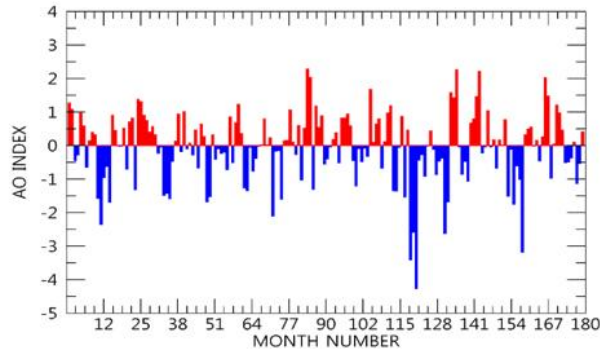


그림 1.10 2000년 1월 1일부터 AO 지수.

그림 1.8에서 FTS와 Kiruna MLS 온도에 성층권 돌연승온의 영향이 각각 다르게 반영되어 있다. 이는 Kiruna MLS 온도가 중심일 근처에서 더 강한 냉각을 보이는 현상으로써 확인할 수 있다. 개별적인 성층권 돌연승온의 영향은 이후 분석에서 더 자세히 고려되지 않았다.



4.2 SDSS 온도의 계절 변화

그림 1.11에서는 APO 지역에서 측정된 온도들의 시계열 그래프를 보여주고 있으며 가로축은 DOY, 세로축은 K단위로 나타낸 온도이다. 여기서는 SDSS 관측이 밤 시간 동안에만 이루어지는 것을 고려하여 MLS가 위도 $32^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{N}$, 경도 $104^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{W}$ 지역의 88km 고도에서 24시-06시 사이에 측정된 온도 자료를 사용하였다. 두 온도는 앞으로 각각 SDSS 온도와 APO MLS 온도로 언급될 것이다. SDSS 일평균 온도와 APO MLS 일평균 온도가 삼각형들로 나타내어졌으며 각각 검은색과 적색에 해당한다. 또한 실선들은 각각의 일평균 온도들의 27일 이동평균이다. 이동 평균의 기간은 태양의 27일 자전주기를 고려하여 결정하였다. 두 온도를 비교해 보면, SDSS 측정 자료가 MLS 자료보다 균일하지 않기 때문에 일평균 온도들의 편차가 더 크게 나타난다. 하지만 그럼에도 불구하고 두 자료 모두에서 겨울철에 높은 온도가 나타나고 여름철에 낮은 온도가 나타나는 중간권계면 온도의 일반적인 계절적 변화가 나타난다. 그러나 MLS 온도에서 SDSS 온도보다 더 뚜렷한 변화를 보이는데 이는 SDSS 온도에 중간권이 낮은 온도를 보이는 기간인 7월과 8월의 온도 관측 결과가 포함되어 있지 않기 때문이다.

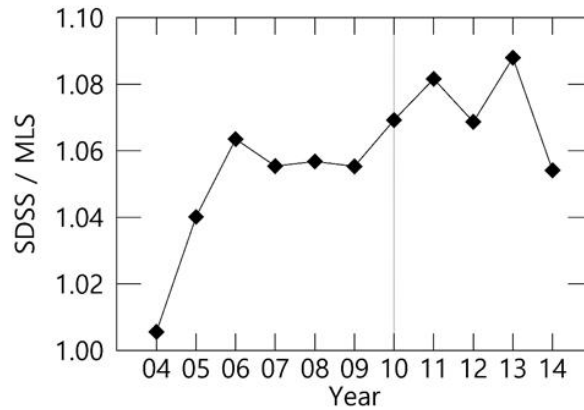


그림 1.10 SDSS 온도와 MLS 온도 차이.

SDSS 온도와 MLS 온도간의 차이가 2010년도 이후에 이전 기간에 비해 상대적으로 큰 값을 보였다. SDSS 연평균 온도와 APO MLS 온도 사이의 비를 정량적으로 비교한 그림 1.10에서 역시 이 현상을 확인할 수 있다. 이러한 차이의 원인은 2009년 여름부터 스펙트럼 측정 기기가 교체되었기 때문일 것으로 추정된다. 그러므로 우리는 이 영향을 고려하기 위하여 2010년 이후의 SDSS 온도들에 두 구간의 평균 온도 차이의 비율인 0.972561의 환산 계수(Scale factor)를 곱하는 방식으로 보정하였으며 이렇게 보정된 온도를 이후의 분석에서 계속 사용하였다. 그림 1.11에서 보이는 2010년도 이후의 온도는 모두 보정된 온도로써 나타내었다. 마지막 그림 1.11(p)는 두 온도의 계절 변화를 보여준다. 계절 변화는 같은 DOY의 일평균 온도들을 평균한 것의 27일 이동 평균으로 정하였다. 이 계절 변화에서도 역시 여름철의 낮은 온도를 확인할 수 있다.

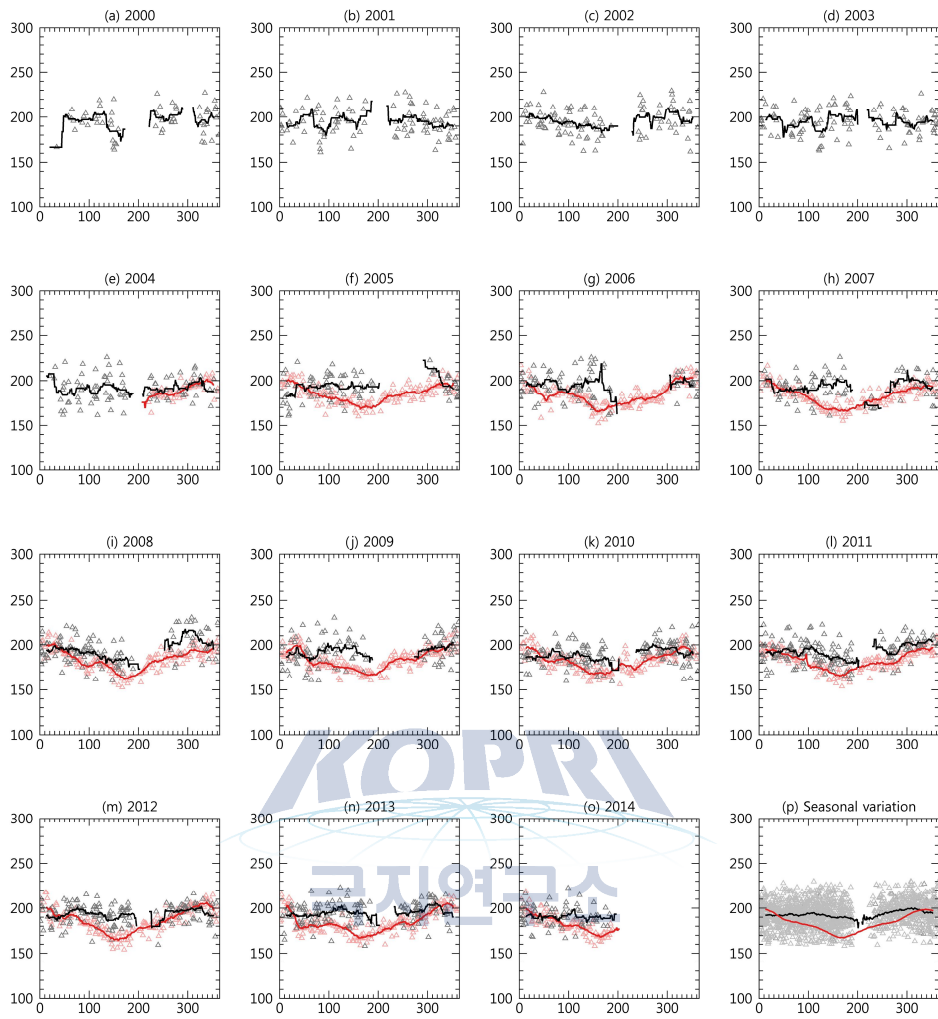


그림 1.11 2000년(a)부터 2014년(o)까지 SDSS 온도 (파랑색)와 APO MLS 온도 (빨간색)의 시계열과 계절적 변화(p).

4.3 태양 활동에 의한 영향

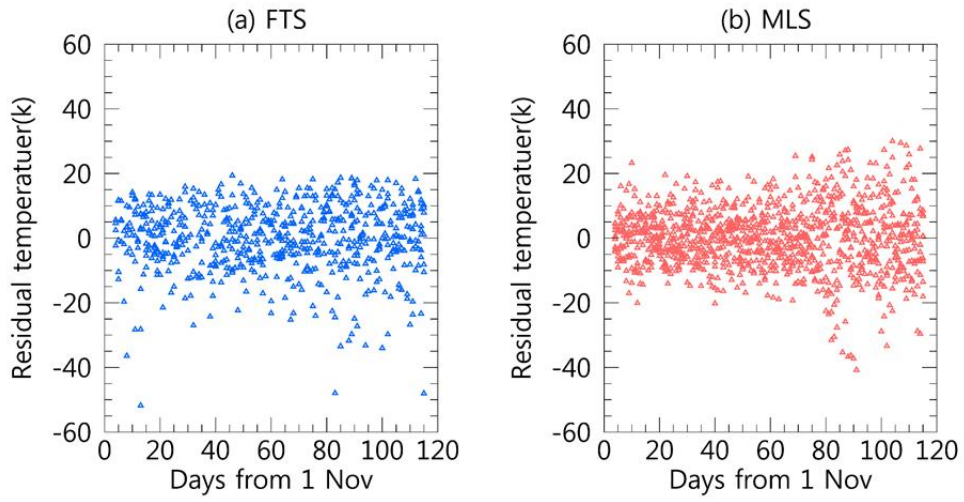


그림 1.12 Kiruna FTS 와 MLS 잔여(residual) 온도.

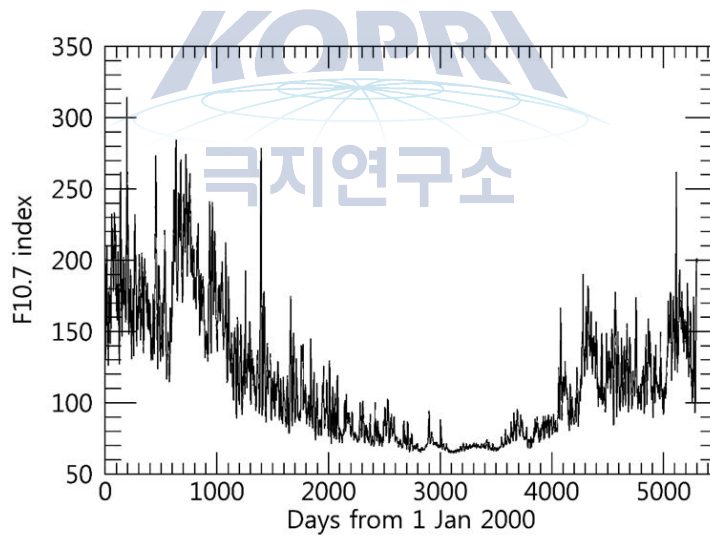


그림 1.13 2000년부터 2004년까지의 F10.7 지수.

태양 활동이 Kiruna 지역의 중간권 온도에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 우리는 계절 변화를 원래 온도에서 제거한 잔여 온도(Residual temperature)들을 구하였다. FTS와 Kiruna MLS 잔여 온도들은 그림 1.12과 같다. 두 잔여 온도들 모두 $\pm 20\text{K}$ 이내에 대부분이 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 Kiruna MLS 잔여 온도에서 성층권 돌연승온 현상에 의한 냉각이 더 뚜렷하게 나타나므로, 계절 변화를 제거하는 과정에서 FTS 온도보다 더 높은 잔여 온도들이 나타나게 되는 경향을 보였다.

태양 활동에 대한 중간권 온도의 반응은 위와 같은 잔여 온도들과 일별 F10.7 지수들을 1차 선형 피팅시키는 것을 통하여 도출하였다. F10.7은 태양 활동을 나타내는 대표적인 지표 중 하나이며, 태양이 방출하는 전파가 최댓값을 가지는 파장인 10.7cm에서 단위진동수 당 태양의 플럭스를 의미한다. 2000년 1월부터 2014년 12월 31일까지 일별 F10.7 지수는 그림 1.13과 같았다. 그 결과 FTS와 MLS 모두 그림 1.14에서 볼 수 있는 것과 같이 각각 $5.0 \pm 1.5\text{K}/100\text{SFU}$ 와 $4.1\text{K} \pm 0.1\text{K}/100\text{SFU}$ 의 양의 상관관계가 나타났다.

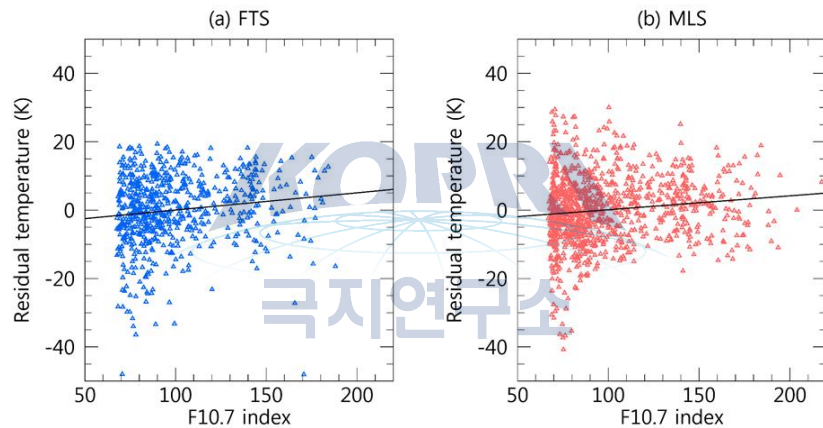


그림 1.14 Kiruna FTS와 MLS 잔여 온도의 태양활동 관련성 (Solar responses).

이러한 양의 상관관계는 이전 연구에서 나타난 결과들과 일치하는 경향을 보인다. 이 결과를 북반구 고위도 지역의 약 85-100km 사이의 온도를 분석한 다른 연구들에서 나타난 태양 반응들과 비교하면, Ammosov et al. (2014)가 보고한 Maimaga 관측소에서의 태양 활동 반응은 Kiruna 지역에서의 값들과 비슷했다($4.24\text{K}/100\text{SFU}$). 그러나 Svalbard에서 유성레이다를 사용하여 2000-2012년 동안 측정된 온도로부터 구한 Hall et al. (2012)의 태양 활동 반응은 약 $16\text{K}/100\text{SFU}$ 로 Kiruna에 비하여 상당히 큰 값을 보였다. 또한 Holmen et al., (2014)는 이 지역에서 1983-2013년의 OH 대기광 관측을 통해 $3.6\text{K} \pm 4.1/100\text{SFU}$ 의 태양 반응을 보였다. 같은 Svalbard 지역에서 보고된 두 결과의 차이가 나타나는 것은 사용한 온도 자료의 기간이 다르기 때문이다. 실제로, Holmen et al., (2014)는 2000년부터 2013년까지의 온도만을 사용하여 $10\text{K}/\text{SFU}$ 의 더 큰 태양 반응을 보고하였다. Kiruna 지역에서 측정된 태양 반응들은 Svalbard에서 측정된 위 결과들보다 더 작은 값을 보이

는 경향이 있다. 이러한 경향은 두 관측지 사이의 위도가 약 10° 정도 차이를 보이기 때문이다.

SDSS의 잔여 온도들과 APO MLS 잔여 온도들은 그림 1.15에 나타내었다. Kiruna 지역에서와 마찬가지로 대부분의 잔여 온도들은 $\pm 20\text{K}$ 의 범위 내에 분포하는 경향을 보였다. 그러나 SDSS 잔여 온도들이 APO MLS 잔여 온도보다 더 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있는 모습이 나타났다. SDSS 잔여 온도와 태양 활동 역시 양의 상관관계를 보였으며, 기울기는 $1.7\text{K}\pm 0.8\text{K}/100\text{SFU}$ 로 나타났다(그림 1.16(a)). APO MLS 잔여 온도에서는 $2.7\text{K}\pm 0.6\text{K}/100\text{SFU}$ 의 태양 반응을 볼 수 있었다(그림 1.16(b)). 중위도 지역의 고도 약 85-100km 사이에서 측정된 다른 태양 반응들은 대부분 3-5K/100SFU 사이에서 보고되었다 (She et al., 2009; Offermann et al., 2010; Perminov et al., 2014). 이 값들은 APO 지역의 태양 반응보다 더 크게 나타나는데, 이 역시 다른 중위도 지역들의 관측지가 APO 지역보다 약 10° 이상 높은 위도에 위치하였기 때문이다. 그러므로 태양 활동에 대한 중간권 온도의 반응은 관측지의 위도가 높아질수록 높은 경향을 보인다고 할 수 있다.

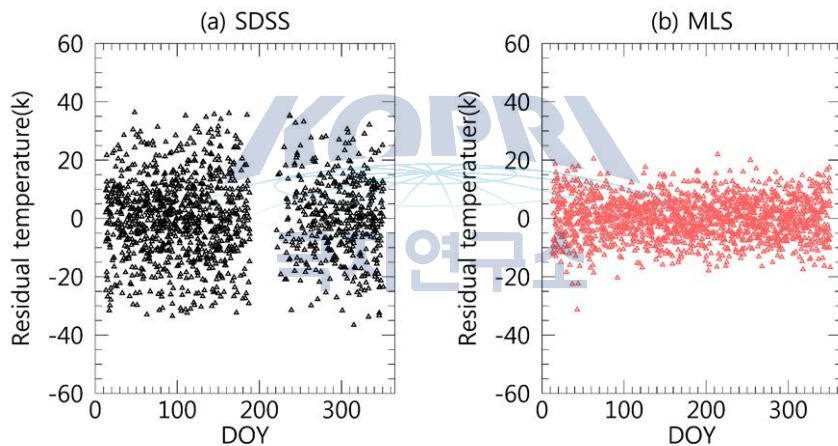


그림 1.15 SDSS와 MLS의 잔여 온도.

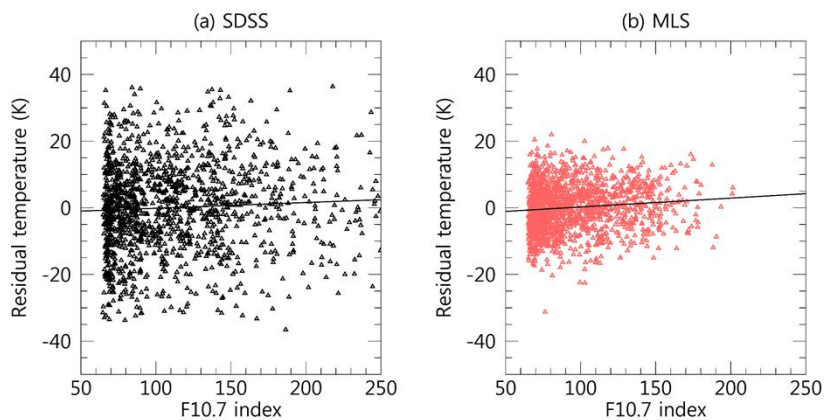


그림 1.16 SDSS와 MLS 잔여 온도의 태양활동 관련성.

4.4 중간권 온도의 장기 변화 추세

위에서 구한 관계식들을 이용하여 각 온도들로부터 태양 활동 반응을 제거한 후에는 다양한 변동 요인들에 의한 영향이 제거된 87km 고도에서의 온도의 장기 변화 추세를 알아보았다. 중간권 온도의 장기적 변화 추세는 시간에 대하여 태양 활동이 제거된 잔여 온도들을 1차 피팅 시키는 것을 통하여 구하였다. 그 결과는 그림 2.15에서 보여진다.

FTS 온도에서는 $-2.6K \pm 1.5K/\text{decade}$ 의 유의한 감소 추세가 나타났다. 그러나 Kiruna MLS 온도의 장기 변화 추세는 유의하지 않은 경향을 보였으며, 약 $0.6K \pm 1.2K/\text{decade}$ 이었다(그림 1.17). 이와 같은 차이가 나타나는 것은 계절 변화를 제거할 시에 성층권 돌연승온에 의한 냉각이 더 강하게 반영된 Kiruna MLS 잔여 온도에서 높은 온도값들이 더 많이 나타나기 때문이다. 따라서 단순히 같은 날들의 온도를 평균하는 방식 이외에 성층권 돌연승온의 영향을 더 잘 고려하는 계절 변화 산출/제거 방법에 대하여 더 연구해야 할 필요성이 제시된다.

Svalbard 지역의 유성레이다 관측 결과에서는 약 $-4K \pm 2K/\text{decade}$ 의 유의한 감소 추세가 나타났지만, 더 긴 기간에 대해 수행된 OH 대기광 관측에서는 거의 0에 가까운 추세를 보였다($0.2K \pm 0.5K/\text{decade}$). 그리고 Sigernes et al. (2003) 또한 Svalbard 지역에서 유의하지 않은 추세를 보고했다. 측정된 장기 변화 추세의 이러한 차이는 태양 활동 반응의 차이와 마찬가지로 두 자료의 측정 기간이 다르기 때문이다.

SDSS 온도와 APO MLS 온도는 둘 모두 유의한 감소 추세를 보였다. 두 장기 변화 추세의 기울기는 각각 $-1.0K \pm 0.9K/\text{decade}$ 그리고 $-1.4K \pm 0.7K/\text{decade}$ 로 APO MLS 온도가 약간 더 많이 감소하는 경향이 있었다(그림 1.18). 중위도 지역에서 측정된 중간권 온도의 다른 장기 변화 추세로는 Offermann et al. (2010)의 결과가 있다. 그들은 1996년-2008년의 기간 동안에 $-3.4K/\text{decade}$ 의 추세를 보고하였으며 이는 본 연구에서 나타난 SDSS 온도의 장기 변화 추세보다 더 큰 값이다. 그러나 She et al., 2009와 Offermann et al. (2010)이 1990년-2000년 동안의 자료를 사용해 구한 장기 변화 추세는 각각 $-0.28K/\text{decade}$, $-0.8K/\text{decade}$ 로 모두 유의하지 않게 나타났다. 더욱이, She et al. (2015)에서는 2010년대의 자료를 더 포함하여 유의하지 않지만 더 큰 감소 추세인 $-1.0K/\text{decade}$ 를 얻었다. 또한 2000년대 초반의 다른 관측들(Bittner et al., 2002; Lowe., 2004)의 유의하지 않은 감소 추세와 Perminov et al. (2014)에서 보고된 $-2.2K/\text{decade}$ 의 감소 추세 역시 이러한 경향과 일치한다.

고위도 지역과 중위도 지역에서 1980년대와 90년대를 포함한 기간에 수행된 선행 연구들에서는 중간권 온도들의 유의하지 않은 장기 변화 추세들이 보고되었으며 2000년대와 2010년대에는 상대적으로 더 강한 냉각 추세가 발견되는 경향이 있었다. 그러나 이러한 급격한 추세 변동이 일어나는 원인은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다. 또한 2000년대와 2010년대를 대상으로 수행한 본 연구에서 Kiruna 지역의 FTS 온도 그리고 APO 지역에서 측정된 중간권 온도들은 유의한 냉각 추세를 보였으며 이는 2000년대 자료를 사용한

다른 연구들의 결과와 일치한다.

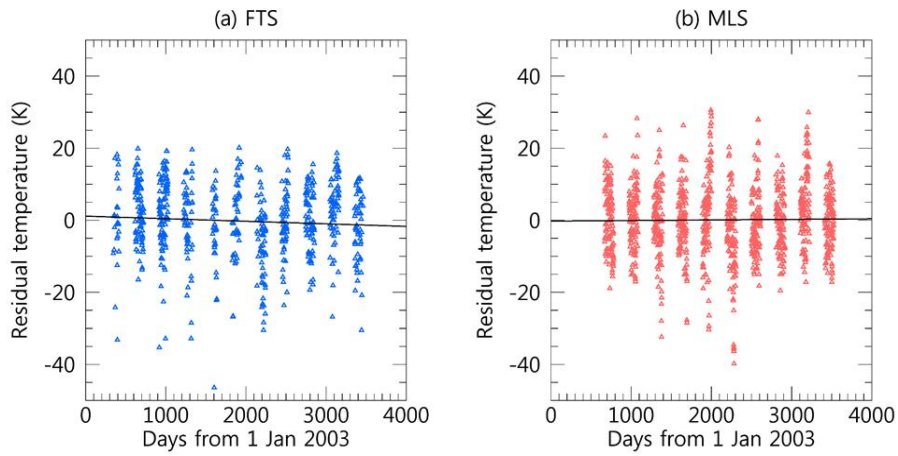


그림 1.17 FTS와 MLS의 태양활동을 제거한 장기적 추세(검은색 실선)와 잔여 온도.

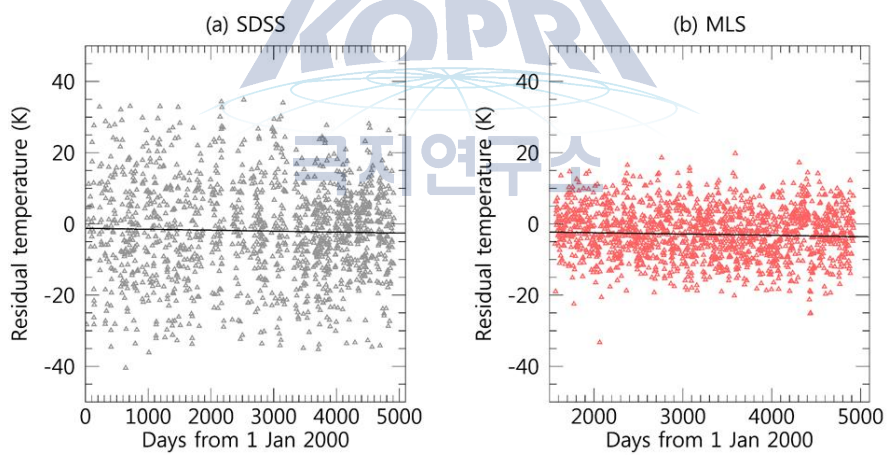


그림 1.18 SDSS와 MLS의 태양활동을 제거한 장기적 추세(검은색 실선)와 잔여 온도.

제 2 절 유성 레이더 관측 자료 분석

1. Esrangle 유성레이더 관측 자료 분석

1.1 관측 장비

충남대학교 우주과학실에서 확보한 Esrangle SkiYmet 유성레이더 자료는 Bath 대학의 Nicholas. J. Mitchell에게 제공받았으며, 실험실 서버에 2002년부터 2015년까지의 데이터가 저장되어 있다. Esrangle 유성 레이더는 1999년 8월 5일에 스웨덴 북부의 키루나에 설치되어 현재까지 관측 운영 중이다. 이 SkiYmet 유성 레이더는 오스트레일리아의 Genesis Software Ltd.와 캐나다 법인의 Modular Radar Desighns (Mardoc Inc.)의 브랜드 이름으로 제조된 상업적으로 생산된 VHF 레이더 시스템이다. Esrangle 유성 레이더는 6kW 피크 전력의 송신기를 사용하고 32.5 MHz의 주파수에서 15%의 듀티 사이클로 작동된다. 펄스의 주파수는 2144 Hz이다. Crossed-element 야기 안테나는 송신과 수신에 모두 사용된다. 안테나의 구성은 한 개의 송신 안테나와 다섯 개의 수신 안테나이며 방위각과는 무관하게 전천(all-sky) 분포의 유성을 관측한다. 5개의 개별 수신 안테나는 간섭계로 작동하도록 구성이 되어있으며 관측된 유성의 방위각 및 각도를 관측한다. 에코 범위의 측정된 고도각은 2 km의 공간 해상도로 유성 에코 높이를 추정할 수 있다. 대부분의 유성 에코는 대략 80~200 km 범위에서 관측이 된다. 표 2.1은 충남대학교 우주과학실에서 확보한 Esrangle의 자료 현황이며, 그림 2.1은 Esrangle 유성레이더가 하루 당 관측하는 유성 에코수에 대한 시계열이다. 대략적으로 Esrangle 유성레이더는 하루 동안 관측되는 유성 에코는 5,000~15,000개이다. 그림 2.1에서 2009년 관측 중지 전 나타나던 유성 에코수의 여름철에 많이 관측되고 겨울철에 적게 관측되는 계절적 변화 추세가 2010년 이후 보이지 않는 이유는 Esrangle의 장비적 결함으로 인한 결과이며, 해당 시기의 자료 사용에는 문제가 되지 않는 것으로 Nicholas. J. Mitchell로부터 답변을 받았다.

표 2.1 : Kiruna Esrangle 유성레이더 관측일수.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Data	365	343	355	329	365	347	116	211	349	348	296	20	48

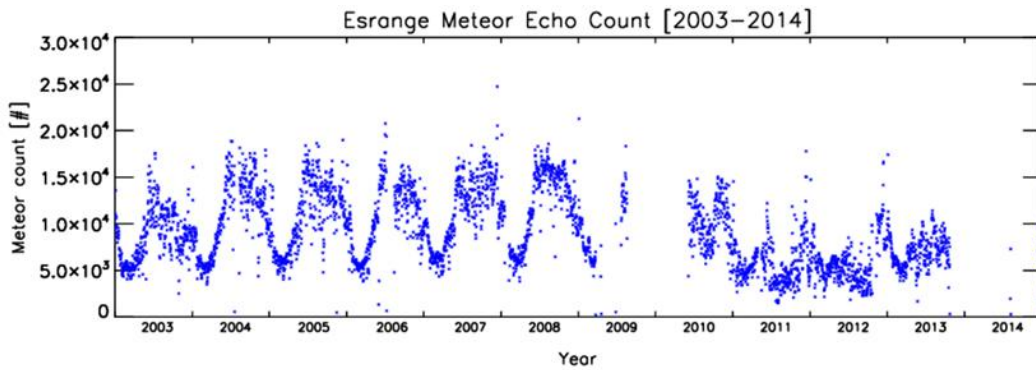


그림 2.1 2003년부터 2014까지의 Esrange의 하루 관측 유성 에코 수.

1.2 자료 분석

가. 유성 소멸시간 자료 분석

유성 레이더 관측으로 얻는 유성 소멸시간 (decay time)은 약 90 km 부근에서 중간권 온도를 추정할 수 있는 방법 중 하나이다. Hocking (1999)은 이를 제안하였다. 대기권 진입한 유성의 소멸시간은 플라스마로 구성된 유성흔 내의 이온과 전자의 양극성 확산 (ambipolar diffusion)을 가정한 유성 소멸 시간을 측정하는 것이다. 그러나 확산 이론과 유성 소멸시간의 측정은 대기의 온도와 압력으로 표현한 $T/P^{1/2}$ 으로 계산할 수 있으며, 정확한 온도 추정을 위해서는 압력에 대한 사전 지식을 필요로 한다. Hocking (1999)는 이러한 압력 정보의 부재와 같은 한계를 고도에 따른 유성 소멸시간 분포의 기울기와 온도 경사 (temperature gradient)를 이용하여 온도 추정 방법 방법을 제안하였다. 양극성 확산 계수와 온도 사이의 직접적인 관계를 알고 있지만 압력에 대한 정보는 얻기 어렵므로 압력을 사용하는 대신 1차 다항식과 1차 다항식의 대수 확산 계수를 높이에 대한 함수로 적용하였다. 이 방법에 따르면, 대기 온도는 대부분의 유성이 소멸되는 높이 부근에서 1차 다항식에 따라 변하는 것으로 가정한다. 1차 다항식을 사용하는 것은 유성 높이의 평균 온도만을 결정하는데 한계가 있는데 해당하는 높이에서 평균 온도의 기울기(temperature gradient)가 필요하다. 여러 연구에서 이러한 방법으로 추정한 온도가 다른 지상 관측 온도 측정치와 비교적 일치한다고 보고되었다 (Singer et al., 2003, 2004; Hocking et al., 2004, 2007; Holdsworth et al., 2006; Stober et al., 2008, Kim et al., 2012). 확산 이론에 따르면 유성흔의 소멸시간은 확산 계수에 반비례하므로 대기 온도와 압력의 함수로 나타낼 수 있다. 그러나 유성 소멸시간은 배경 대기 매개 변수에 더해 유성 궤도 내의 플라스마 밀도의 크기에 영향을 받는다는 것이 알려졌다 (Ballinger et al., 2008, Singer et al., 2008; Yonger et al., 2008; Kim et al., 2010). Kim et al. (2010)은 유성 소멸시간의 측정으로부터 온도 추정이 유성흔 내의 플라스마 밀도에 영향을 받을 수 있다는 연구를

하였다. 밀도가 높은 유성에 대해서는 유성흔의 소멸이 유성흔 내에서 높은 플라즈마 밀도로 인해 확산 과정뿐만 아니라 화학적 재조합 과정에 의해서도 영향을 받기 때문에 중간권의 온도를 추정하기 위해선 유성흔의 플라즈마 밀도가 낮은 유성을 사용해야 한다고 제안하였다.

Estrange SkiYmet 유성레이더는 별도로 직접적인 유성흔의 선밀도를 제공하지 않고 수신된 신호의 진폭을 제공하기 때문에 유성흔의 선밀도를 수신된 신호의 진폭(A)과 유성흔까지의 거리(r)로부터 추정하였다. 유성흔의 선밀도는 수신된 신호의 세기(P)와 관측된 유성흔까지의 거리(r)와 비례하는 관계를 갖으며 ($\rho \propto (P \times r^3)^{0.5}$), Singer et al. (2008)에 따르면 수신된 신호의 세기는 신호의 진폭(A)의 제곱과 비례한다($P = c_c \times A^2$, $c_c \cong 4.6 \times 10^{-21}$; Calibration factor). 즉, 유성흔의 선밀도는 $\rho \propto (A^2 \times r^3)^{0.5}$ 의 관계로 대략적으로 추정할 수 있다.

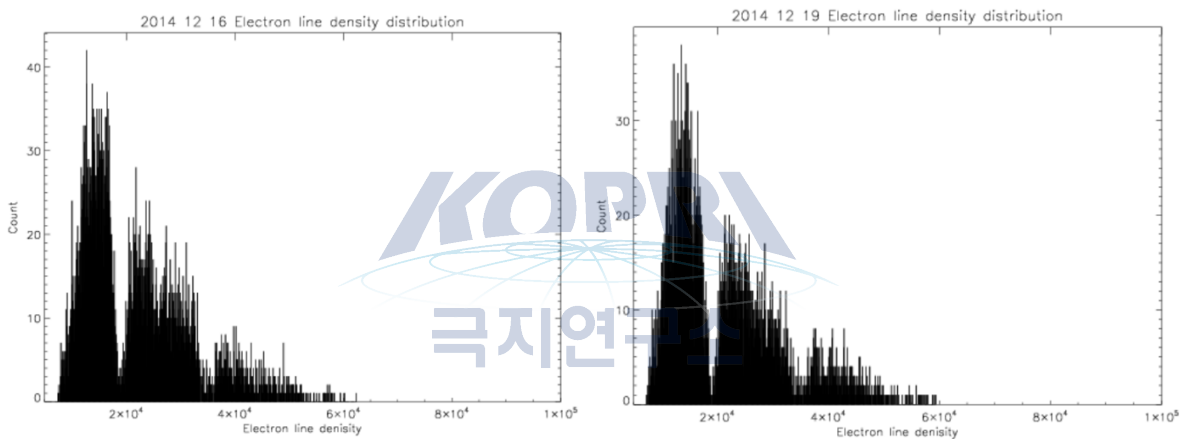


그림 2.2 하루 관측된 유성흔 선밀도의 분포.

그림 2.2은 Estrange 유성레이더로 하루 동안 관측된 유성흔의 선밀도 분포에 대한 예시이다. 좌측의 2014년 12월 16일, 2014년 12월 19일 모두 날짜에 관계없이 유성흔의 선밀도 분포는 어떤 특정한 값을 기준으로 분류가 됨을 확인할 수 있다. 우리는 Kim et al. (2010)의 연구에 따라 유성흔의 밀도가 낮은 그룹($< 2 \times 10^4$)의 자료 중 관측 천정각이 $10^\circ \sim 50^\circ$ 사이인 자료를 사용하였다.

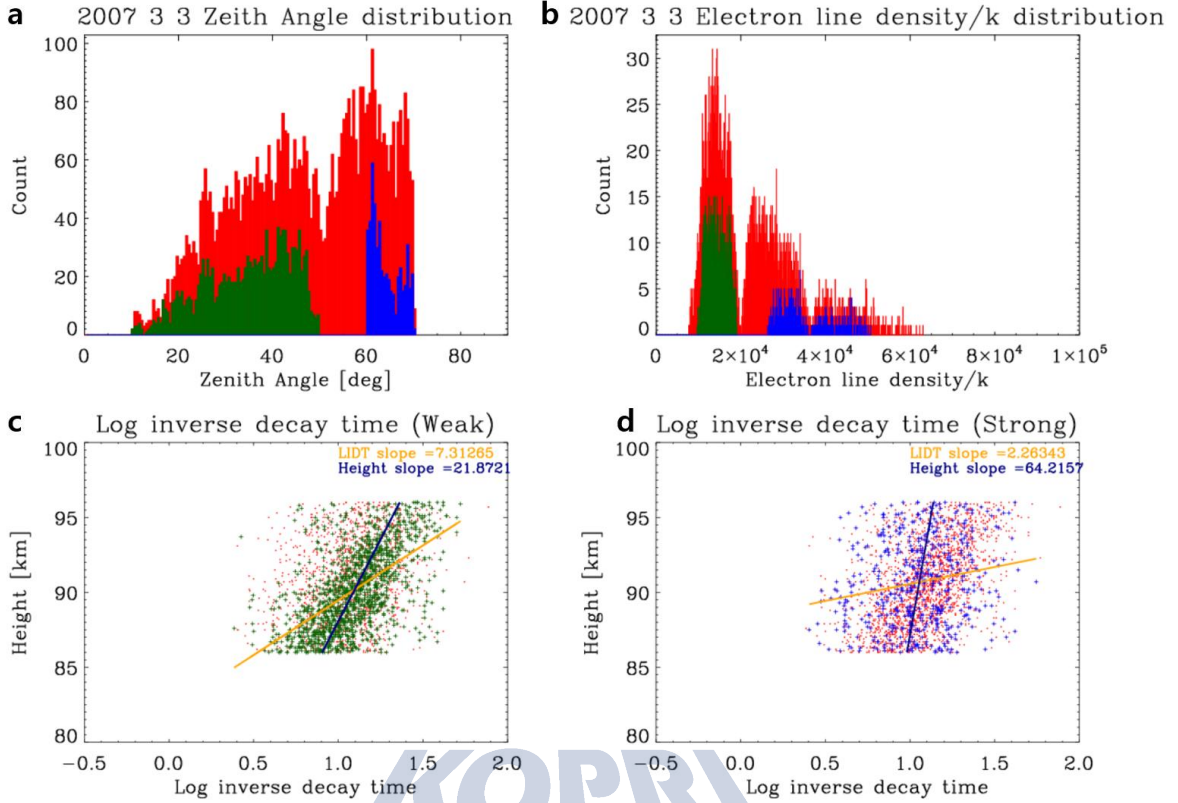


그림 2.3 2007년 3월 3일 하루 동안 관측된 a) 관측된 유성의 천정각 분포 (높은 선밀도 그룹: 파랑색, 낮은 선밀도 그룹: 녹색), b) 유성흔 선밀도 분포, c) 선밀도가 낮은 그룹의 고도에 따른 소멸 시간 log inverse 분포, d) 선밀도가 높은 그룹의 고도에 따른 소멸시간 log inverse 분포.

그림 2.3는 유성흔 선밀도 분포에 따라 높은(strong), 낮은(weak) 그룹을 나누어 살펴본 그림이다. 그림 2.3 a는 선밀도가 높은 그룹과 낮은 그룹의 분류가 유성 천정각에 강하게 의존하여 분류된다는 결과를 살펴볼 수 있는데, 이는 Kim et al. (2012)와 동일한 결과이다. 분류된 유성 그룹에 따라 고도에 따른 소멸시간의 log inverse 분포 (LIDT)를 살펴본 그림 2.3 c와 d는 각각 선밀도가 낮은 그룹의 LIDT 분포, 선밀도가 높은 그룹의 LIDT 분포를 보여준다. 또한 그림 2.3 c,d의 청색 실선과 노란색 실선은 각각 고도에 의존한 분포의 기울기와 LIDT에 의존한 분포의 기울기를 나타낸다. 이전 연구 (Hocking et al., 2001; Stober et al., 2008; Kim et al., 2012)에서는 고도에 의존한 분포의 기울기를 갖는 추세선이 온도 추정을 하는데 상대적으로 직접적으로 용이하다는 결과가 ESRANGE 유성 레이더에서도 동일한 결과가 나왔다. 그러나 Hocking et al. (2001)에 따르면 통계적 비교 기법 (Statistical Comparison Technique: SCT)으로 구한 기울기(S_{SCT})를 사용하여 에러를 최소한으로 줄여 온도 추정을 하였다.

$$S_{SCT} = \left(1 - \left(\frac{\epsilon_h}{\sigma_h}\right)^2\right) S_h \quad (2.1)$$

ϵ_h 는 고도 h 에서의 관측 오차를 의미하며, σ_h 는 유성이 관측된 거리와 천정각으로부터 고도를 추정하는데 발생하는 표준편차이고 S_h 는 앞서 구한 고도에 의존한 분포의 기울기(노란색 실선)을 의미한다. 우리는 ϵ_h 을 1.0 km와 σ_h 이 1.0으로 설정하였을 때 해당 기법으로 온도를 추정된 결과와 다른 관측기기로 온도를 추정된 결과가 잘 일치한다는 Kim et al. (2012)에 따라 그림 2.4과 같이 낮은 선밀도 그룹으로부터 S_{SCT} 값을 계산을 하여 그림 2.5와 같은 2003년부터 2014년까지의 S_{SCT} 의 시계열을 구하였다. 그림 2.5의 시계열을 살펴보면, S_{SCT} 는 중간권 온도의 특성인 여름철에 온도가 낮고 겨울철에 온도가 높은 성향이 반영되어 있음을 살펴볼 수 있다.

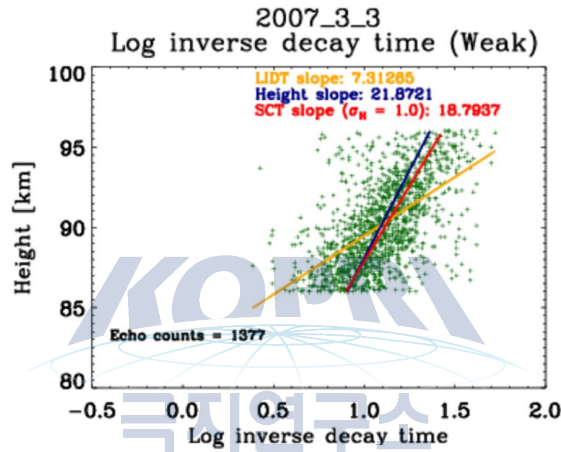


그림 2.4 유성 선밀도가 낮은 그룹의 고도에 따른 소멸시간 분포와 그에 따른 3가지 추세선.

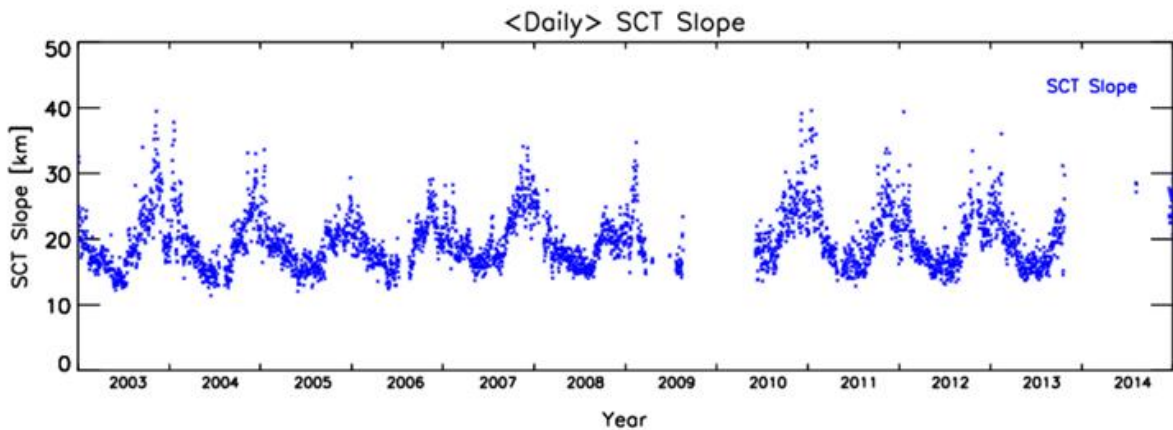


그림 2.5 2003년부터 2014년까지의 S_{SCT} 의 변화.

위와 같이 계산된 S_{SCT} 을 이용해서 Hocking (1999)에서 소개된 온도 추정 방법

$$T = S_{SCT} \left(2T_g + \frac{mg}{k} \right) \log_{10} e \quad (2.2)$$

을 통하여 온도를 추정하였다. T_g 는 온도 경사도, m 은 대기의 분자 질량, k 는 볼츠만 상수를 의미한다. 온도 경사도를 나타내는 T_g 는 Hocking et al. (2004)의 Fig. 4를 참조하여 Esrange 유성 레이더가 위치한 Kiruna 지방의 연간 온도 경사도를 적용하여 진행하였다 (그림 2.6).

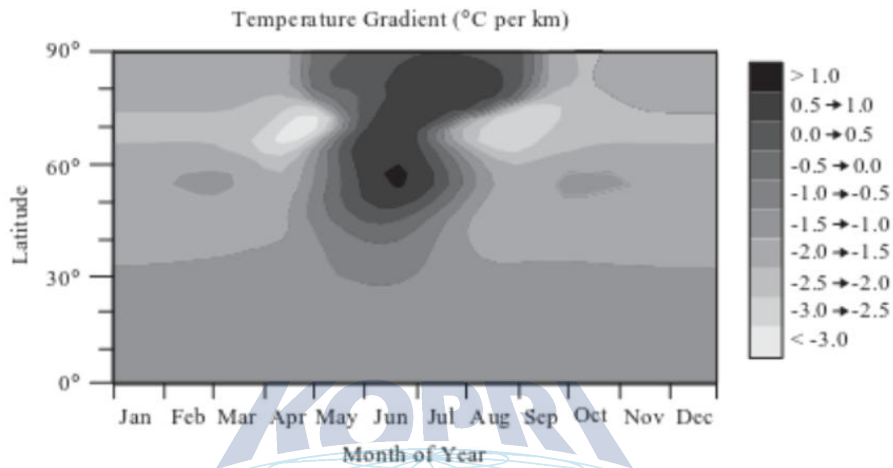


그림 2.6 온도 경사도 모델 (Hocking et al., 2004).

나. 유성 에코의 고도 분포 분석

유성은 대기 중으로 진입하여 고도 70 ~ 110 km의 중간권 상부 부근 대기 입자들과 마찰로 인해 소멸되는 기작은 익히 알려져 있는 사실이다. 유성 레이더는 송신된 신호가 중간권 상부로 진입하는 유성을 소멸되는 과정에서 유성흔 내의 마찰에 의해 생성된 플라즈마에 수직 방향으로 후방 산란되어 돌아오는 신호를 관측한다. 유성 최빈 고도(MPH; Meteor Peak Height)는 대략 고도 90 km로 이 고도 부근으로 유성이 집중되어 관측이 된다. McKinley (1961)에 따르면 MPH는 대기 밀도에 크게 의존한다는 결과가 있다. 그러나 MPH 근방의 고도에 따른 유성 에코의 관측 분포는 대기의 높이 척도(atmospheric scale height)와 유성의 질량 분포에 따라 의존하는 것이 Kaiser (1954)의 결과이다. Lee et al. (2016)은 유성 에코의 고도에 따른 분포에서 전치반폭(Full Width at Half Maximum; FWHM)과 중간권 상부의 온도와의 선형관계를 찾아내어 유성 레이더로부터 중간권 온도를 추정하는 방법을 새롭게 제시하였다. FWHM과 온도와의 관계에 대해 설명한 Lee et al. (2016)에서는 배경 대기 압력과 FWHM의 관계를 정역학상태 방정식(식 (2.3))으로 설명하였다.

$$\frac{\partial \ln P}{\partial z} = -\frac{g}{RT} \quad (2.3)$$

중력 상수 g 와 기체상수 R 이 포함된 정역학상태 방정식에서 FWHM에서의 각각 하한 고도(z_1)와 상한 고도(z_2)에서의 압력 $P_1(z_1)$ 와 $P_2(z_2)$ 을 식 (2.3)에 적용하면

$$\text{FWHM} = z_2 - z_1 = \frac{R}{g} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) < T > \quad (2.4)$$

으로 표현이 가능하다. $< T >$ 는 z_1 와 z_2 사이 대기의 평균 온도로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$< T > = \frac{\int_{P_1}^{P_2} T d \ln P}{\int_{P_1}^{P_2} d \ln P} \quad (2.5)$$

식 (2.5)로부터 대기의 평균온도를 구할 시 압력(P)을 관측으로 알기에는 용이하지 않기 때문에 식 (2.4)에 따른 고도에 따른 관측된 유성 분포에서의 FWHM와 대기의 평균 온도와 선형관계로부터 온도를 추정할 수 있다.

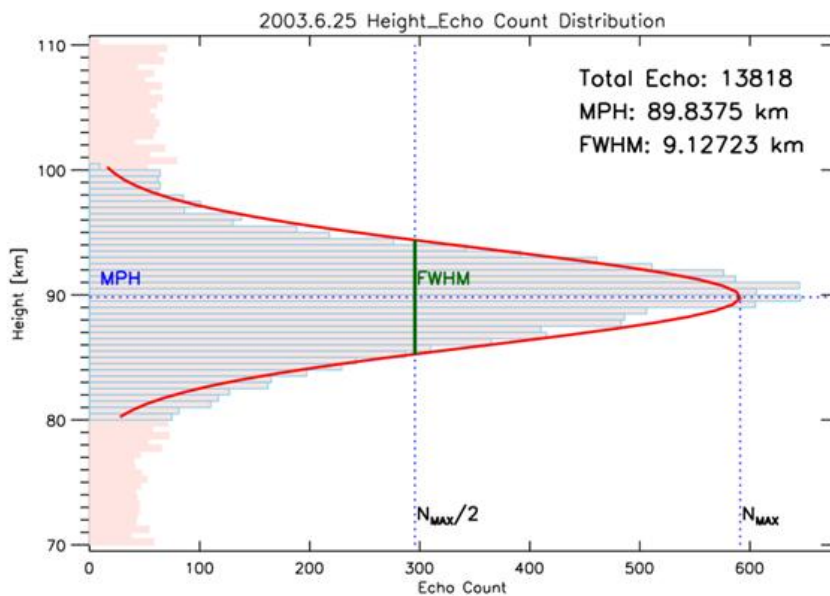


그림 2.7 Estring 유성레이더의 2003년 6월 25일 유성 관측 고도 분포와 MPH, FWHM과 가우시안 추세선 (빨간색 실선).

그림 2.7은 Kiruna Esrance 유성 레이더로 2003년 6월 25일 하루의 고도에 따른 관측된 유성 에코 분포이며 관측된 유성은 13,818개이다. Esrance 유성레이더로 관측되는 유성의 고도 80 km ~ 100 km 영역이 자료 분석에 신뢰성이 높다 판단하여 해당 구간의 유성 에코 관측 분포에 대한 가우시안 피팅(빨간색 실선)을 행하였다. 그 결과 대략 고도 90 km의 MPH와 9 km의 FWHM을 갖는 분포를 보였다. 그림 2.8은 하루 동안의 MPH와 FWHM의 상한고도와 하한고도를 나타낸 그림과 2003년부터 2014년까지 FWHM을 시계열로 나열한 그림이다.

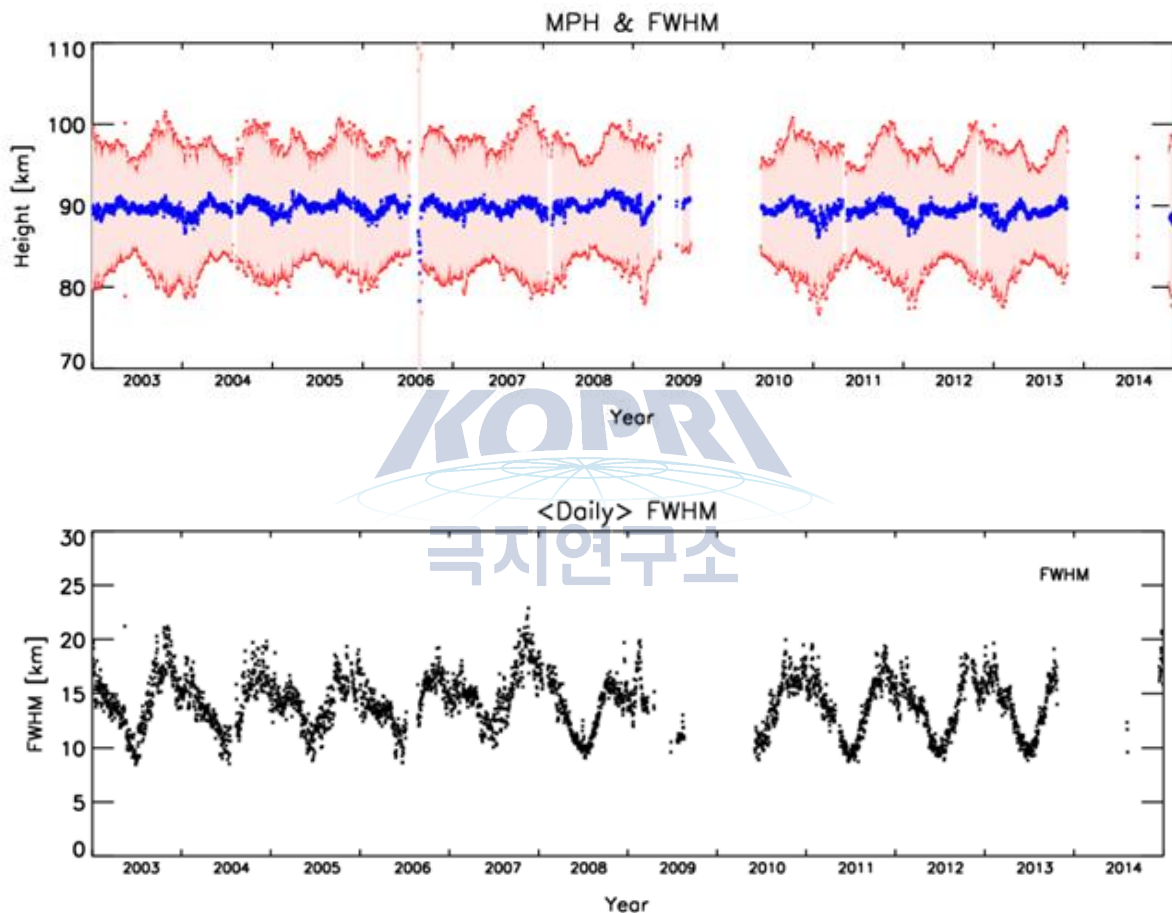


그림 2.8 2003년부터 2014년 까지 Esrance 유성레이더로 관측한 (상) MPH와 (하) FWHM.

그림 2.8에서도 유성 소멸시간의 고도에 대한 기울기로 살펴본 그림 2.5와 같이 중간권 온도의 특성을 반영한 여름철에 높고 겨울철에 낮은 온도 추세와 같은 여름철에 높은 FWHM과 겨울철에 낮은 FWHM의 성향이 나타나며, 이는 온도와 FWHM간의 선형관계가 있음을 생각해볼 수 있다.

식 (2.4)에서 FWHM과 온도의 상관관계를 살펴보기 위해 MLS 온도자료를 이용하여 선형관계를 살펴보았다. MLS의 자료 설명은 1절에서 설명하였으므로 2절에서는 생략한다. MLS가 관측을 시작한 2004년부터 2013년까지 (Esrance 유성레이더 데이터수가 적은

2014년 제외) MLS로 관측한 Kiruna 지방 고도 90km에서의 일평균 온도와 Esrangle 유성 레이더의 일 FWHM의 상관관계(correlation)은 표2.2와 그림 2.9로 살펴 볼 수 있다.

표 2.2 Kiruna Esrangle 유성레이더 FWHM과 MLS 온도와의 상관관계.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Correlation	0.75	0.78	0.76	0.75	0.92	0.86	0.92	0.94	0.91	0.93

10년간 MLS 온도 자료와 Esrangle 유성레이더로 도출한 유성 에코의 고도 분포 FWHM의 상관관계가 가장 높은 해는 2011년으로 0.94의 상관관계 지수가 나타났다. 2011년의 FWHM과 MLS 온도와의 선형관계는 그림 2.9의 파랑색 실선으로 표현하였다. 2011년의 상관관계를 나타내는 파랑색 실선으로 표현된 일차함수의 기울기와 y-절편 값은 각각 8 K/km와 60 K의 값을 얻었다. 이 2011년의 FWHM과 MLS 온도와의 선형관계를 전 기간의 FWHM을 적용하여 온도를 추정하였다.

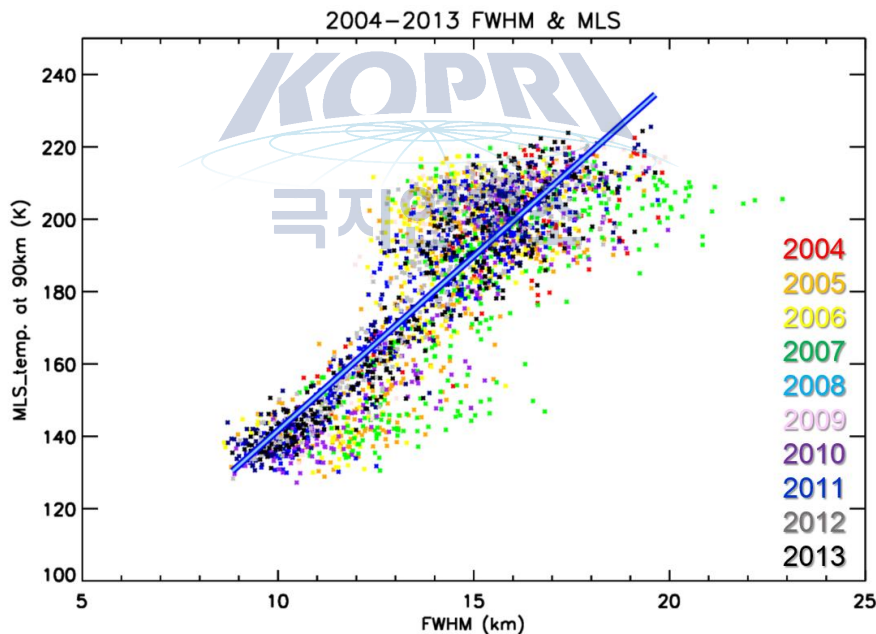


그림 2.9 Esrangle 유성 레이더의 연간 FWHM와 MLS로 관측한 Kiruna 상공 고도 90 km 온도와의 상관관계.

1.3 결과 및 토의

2.1.2절에서 소개한 유성 레이더 자료 분석을 토대로 2003년부터 2014년까지의 온도를 추정하였다. 그림 2.10은 1절에서 다룬 Kiruna FTS 온도 자료(빨간색)와 2가지 방법으로 추정한 Esrangle 유성레이더 온도 자료 (검은색, 파란색) 그리고 MLS 온도 자료(녹색)

를 비교한 그림이다. S_{SCT} 로 추정된 온도(파란색)는 MLS 온도와 FTS 온도 자료보다 크게 나타나는 차이가 보였는데, 이는 고도에 따른 소멸시간의 분포의 표본이 적고 또한 분포의 산포도가 크므로 정확성을 높이기 위해 자료 선정 작업을 추후에 더 진행해보아야 할 사항이다. Lee et al. (2016)이 제안한 FWHM과 MLS 온도와 상관계수로 구한 즉 2011년때의 FWHM과 MLS 온도와 선형관계를 일괄적으로 모두 적용한 온도(검은색)은 비교적 FTS 온도와 MLS 온도와 2011년뿐만 아닌 거의 모든 구간에서 잘 맞는 것으로 보인다.

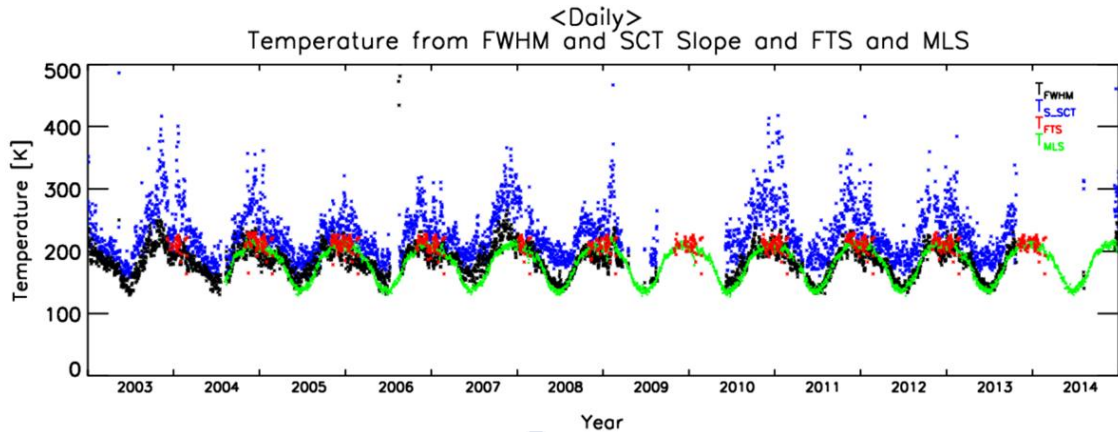


그림 2.10 2003년부터 2014년까지 유성레이다로 추정된 온도 (유성의 소멸시간, 유성 고도분포의 FWHM)와 FTS 온도와 MLS 온도 자료 비교.

그러나 아직 FWHM 산출 정확성은 낮다고 판단되기 때문에 개선되어야 할 필요가 있다. 여름철 에코의 고도 분포를 보여준 그림 2.7에서는 유성의 에코들이 비교적 관측되기 때문에 MPH 부근으로 많이 관측 되는 양상을 보이며 이에 따라 FWHM 산출 정확성은 높다 볼 수 있다. 반면, 겨울철 사례를 나타내는 그림 2.11에서는 5000개 내외로 비교적 적게 관측됨에 따라 에코의 고도 분포와 가우시안 피팅이 잘 맞지는 않고 FWHM의 산출 역시 정확도를 올릴 필요가 있다고 판단된다. 또한 Lee et al. (2016)에서는 FWHM과 MLS 온도의 상관계수를 추정할 때 y-절편을 0으로 두어 선형관계를 구하였다. 본 연구에서도 y-절편을 0으로 맞추어 온도를 추정하는 작업이 더 필요하다.

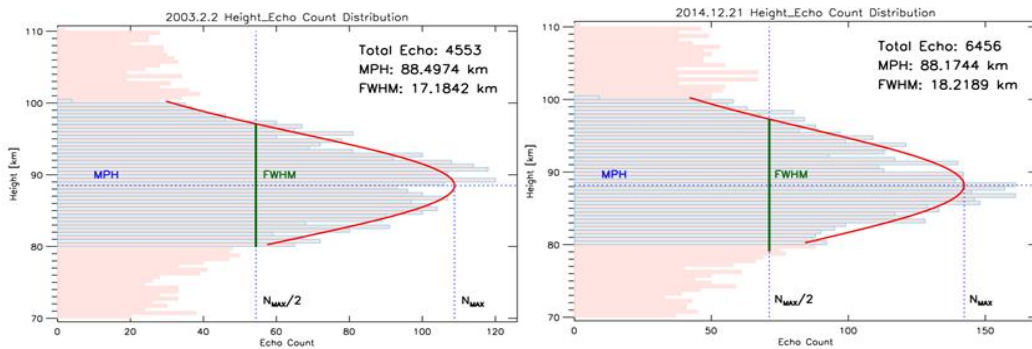


그림 2.11 Esrange 유성 레이다로 관측한 겨울철 에코의 고도 분포.

2. 남극 세종기지 유성레이다 관측 자료 분석

2.1 관측 장비

세종기지 유성레이더(62.22°S, 58.78°W)는 2007년 3월에 설치된 이후 현재까지 지속적으로 중간권 및 열권하부(MLT)지역을 관측하고 있다. 유성레이더는 다른 광학장비와는 다르게 날씨의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 24시간 MLT지역에서의 유성들을 관측하여 MLT지역의 특성을 알아 낼 수 있다. 세종 기지와 같은 경우 2012년에 최대 출력을 12kW로 증가시키면서 계절에 따라 15,000 ~ 35,000개의 유성이 관측되게 되었다. 또한 전파 도달 거리는 80-307 km 이며 주로 시선거리 70-170km에서 에코가 관측되기 때문에 MLT 지역의 온도와 바람 속도와 같은 필수적인 대기 요소를 수집하기 위해 사용되고 있다. 유성이 대기를 뚫고 들어올 때, 유성 표면은 대기 분자와 충돌하게 되면서 원통 형태의 이온화 흔적(ionization trail)을 남기며 제거된다. 소멸된 유성에 의해 만들어진 이온화 흔적은 자유전자와 양이온으로 구성되어 있다. 유성 흔적으로부터 레이더까지의 거리에 비해 송신 안테나와 수신 안테나의 거리는 매우 짧기 때문에, 일반적으로 유성 레이더 시스템은 단 상태(mono-static) 레이더로 분류한다. 세종기지 유성 레이더는 송신 라디오 파장과 흔적으로부터 수신되는 신호가 거의 직각을 이루어 이온화된 유성 흔적을 관측하도록 제작되었다. 그림 2.12에서 볼 수 있듯이, 레이더는 주로 전체 유성 흔적 중 약 1km 정도의 작은 부분만을 감지한다.

세종기지의 유성 레이더는 유성 관측에서 다소 큰 공간범위를 갖고 있다. 유성 에코는 약 250km 이상의 거리에 있는 전체 방위각에 대해서 감지된다. 추가적으로, 상대적으로 적은 전력으로 유성을 감지하도록 만들어졌다. 이러한 것들은 유성 고도의 상층 경계선(<110km) 및 하층 경계선(>70km) 모두에서 충분한 양의 과학적 목적 유성 샘플을 얻을 수 있도록 해준다.

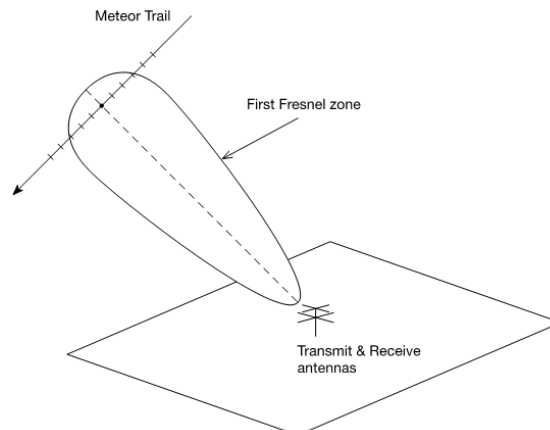


그림 2.12 단 상태 레이더 관측의 기하학 구조.

세종기지 유성 레이더의 구성은 1개의 송신 안테나와 5개의 수신 안테나, 송신기, 데이터 습득 시스템으로 구성된다. 배치는 그림 2.13와 같으며 수신 안테나는 2λ , 2.5λ 의 거리에 대하여 수직으로 나열된 기준선에 설치되어 있다. 이 길이는 상호 안테나 중첩효과 뿐 아니라 유성의 공간 정보에 대한 불확실성 또한 최소화 시켜준다.

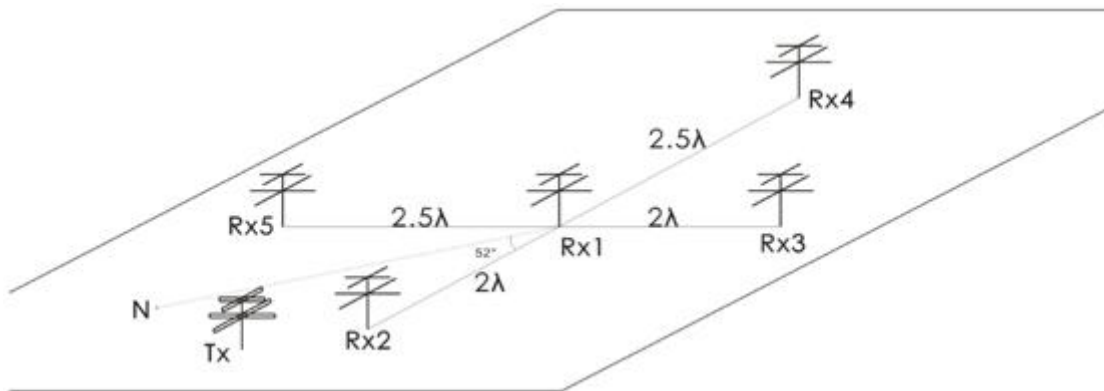


그림 2.13 세종기지 유성 레이더의 안테나 배치.

레이더는 더 높은 유성 감지를 위한 정상 조건인 33.2MHz의 주파수를 사용한다. 송신기는 12KW의 전력과 적합한 펄스 길이 및 펄스 반복 주파수(PRFs)의 가우시안 코드의 8.4% 사용률로 사용된다. 레이더의 운전 파라미터를 표2.3에 나타냈다. 레이더 데이터 획득은 윈도우 기반의 획득PC("Acquisition" PC)로 실행된다. 레이더 컨트롤 프로그램은 주어진 시간과 주기에서 작동되도록 실험하고 보완된 수차례의 실험들 시퀀스로 조절할 수 있다. 리눅스 기반의 분석PC("Analysis" PC)는 획득PC에서 생성된 미가공 데이터(raw data)를 전송받기 위해 내부망(internal network)으로 레이더에 연결하고, 사용자에게 인터페이스를 제공한다. 레이더는 자동으로 작동하며, 2분 주기 매 관측 사이클에서 5초의 구조변경 시간을 제외하고 계속해서 실행된다.

표 2.3 세종기지 유성 레이더에 사용된 레이더 작동 파라미터. 사용률(duty cycle)은 $EPW(s) \times PRF(Hz) \times CI \times 100$ 으로 계산된다.

Parmeter	Value	Units
Carrier frequency	33.2	MHz
Carrier wavelength	9.04	m
Transmit power	8	kW
Transmit polarization	Circular	
Effective pulse width (EPW)	47.52	s
	7200	m
Pulse repetition frequency (PRF)	440	Hz
Duty cycle	8.4	%
Receiver filter width	18.1	kHz
Pulse code type	4-bit complementary	
Pulse shape	Gaussian	
Range	80-306.8	km
Range sampling resolution	1.8	km
Range aliasing	No	
Coherent integration (CI)	4	
Effective sampling time	0.009	sec
Number of samples	12650	
Acquisition length	115	sec

비록 송신 안테나의 위치가 중요하지 않을지라도, 이는 적어도 수신 안테나 근처에서 2λ 이상 떨어져 있어야 한다. 직선 편광(linear polarization)에 의한 페러데이 회전 효과(Faraday rotation effects)를 제거한 유성 감지 효율성을 증가시키기 위해, 원형 극 송출(circular polarized transmission)이 적용되었다.

분석PC로부터 수행된 데이터 분석은 미가공 데이터를 몇몇 파라미터를 사용하여 분석하게끔 한다. 분석PC는 매 시간에 대한 2분 단위 미가공 시계열(raw time series) 또는 유성 감지와 연관된 4초 부분집합을 저장한다. 일단 미가공 데이터로부터 첫 번째 분석 파라미터가 생성되면, 사후분석 모듈은 도착 유성 각(angles of arrival)과 시선 방사 흐름(radial drift) 속도를 통해 바람 속도를 추정한다.

송신과정은 주로 습득PC, 트랜시버(transceiver), 송신기에서 시행된다. RF carrier generation의 초기 설정값에서, 습득PC는 COM2 포트를 통해 트랜시버 내의 최고잡 간의 전압이 3V인 연속된 RF 신호를 생성하는 합성기(synthesizer)를 컨트롤한다. 습득PC에 의해 프로그램된 방아쇠 펄스는 VHF solid state transmitter(STX) 내부의 PA 컨트롤러로 이동된다. 변조된 펄스는 신호를 6개의 채널로 분리시키는 PA 드라이버 모듈을

통과하게 되고, 이는 각각 진폭되어 4KW 이상의 파워로 송출되기 위해 PA 모듈로 보내진다. 하지만 현재 세종기지 유성 레이다는 3PA 모듈로 작동되고 있으며, 단지 3 채널의 PA 드라이버가 활성화 되어있다. 3개의 증폭된 신호가 RF 파워 콤바이너로 이동되면, 송출 안테나로 향하는 두 개의 송출선으로 나뉘지기 전까지 하나로 결합된다. 각각의 송출선은 교차된 두 개의 송출 안테나 중 하나의 안테나에 연결된다. 송출선 중 하나는 원 편광(circular polarization)을 위해 90° 만큼 지연되도록 구성되어 있다.

유성 흔적으로부터 되돌아온 전파 신호가 5개의 수신 안테나에 도달할 때, 그것들은 감마 마치(gamma match)에 50옴의 임피던스와 유도저항으로 보정되어 접힌 안테나에 교차된다. 이러한 점에서, 신호는 배경 잡음을 제거하기 위해 광대역 필터기를 통해 걸러지며, 약 20dB 정도 추가되어 증폭된다. 그 다음 신호는 증폭되고 광대역으로 필터되는 다운 컨버터를 지나게 되고, 수신 신호 주파수(33MHz)의 차이, 기준 신호(113MHz)의 합과 같은 intermediate frequency(IF) 신호가 생성되는 믹서를 통과하게 된다. 전형적인 VHF 유성 레이다 시스템에서, 수신 신호 주파수는 IF 단계에서 증가한다. 새로운 80MHz IF 신호는 원치 않는 잡음을 제거하기 위해 IF 필터를 지나며, 0-40dB 범위에서 증폭된다. 다운 컨버터에서 출력된 신호는 18.1-404.0kHz 대역폭에서 조절 가능한 수신 필터를 포함한 디텍터를 통과하게 된다. 효과적인 대역폭은 신호와 잡음 비율을 최대한 좋게 하기 위해 사용된 펄스 길이에 맞도록 조절된다. 그 후 각각의 채널에 대한 수신 신호 사이에 연관된 진폭과 위상 정보를 추론하기 위해 각의 채널은 in-phase(I)와 quadranture(Q) 성분으로 나뉘진다.

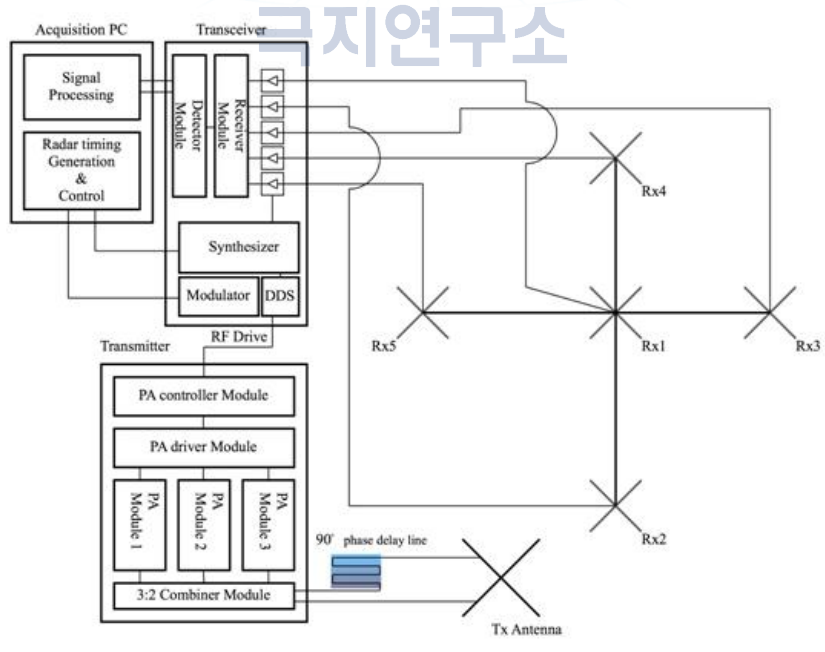


그림 2.14 세종기지 유성 레이다의 도면. 회색 선(얇은 선)의 교차점은 수신 안테나를, 검정 선(굵은 선)의 교차점은 교차된 다이폴 송신 안테나를 나타낸다.

2.2 자료 분석

유성흔으로부터 반사되어 관측된 정보를 통해 관측된 신호의 고도, 거리, 속력, 유성흔 안 전자 선 밀도 등을 얻어 낼 때 유성이 대기로 진입하는 각도는 단일 유성레이더를 통해서 알 수 있는 방법이 없지만 우리는 아래와 같은 가정을 통해 유성의 천정각이 대기로 진입하는 진입각이라고 하였다. 먼저, Ceplecha et al. (1998) 에 의하면 지구에 유입되는 산발적인 유성들(sporadic meteor)은 천구상에 위치한 총 6개의 source인 prograde apex, retrograde apex, hellion source, anti-hellion source, north and south toroidal source로부터 지구로 유입이 된다. 여기서 hellion source와 anti-hellion source는 지구가 공전하는 방향에 대하여 왼쪽과 오른쪽 70°부근에 위치해있고 또한 Taylor and Elford (1998) 에 의하면 이 두 가지 source로부터 유입이 되는 유성들은 대략 10~40km/s의 속력을 가지고 관찰이 된다고 한다.

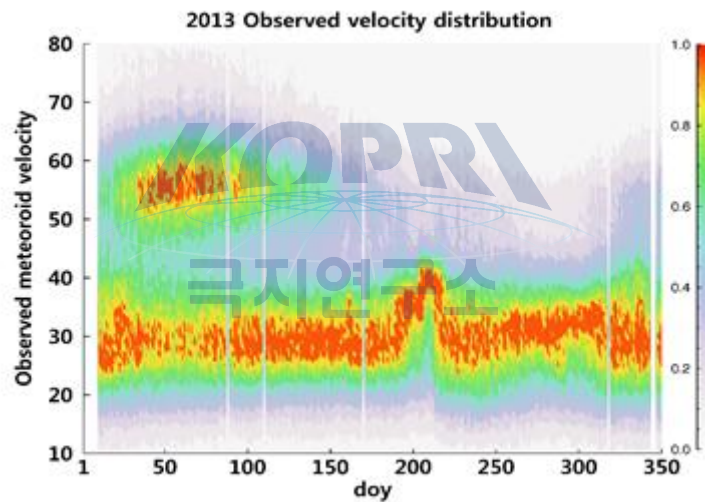


그림 2.15 세종기지 유성레이더로 관측한 2013년 유성 속도 분포

그림 2.15은 세종기지 유성레이더를 이용하여 관측한 2013년 유성 속도의 연중 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 Southern Delta Aquarids가 관측된 210일경을 제외하고는 일년 내내 평균 30km/s의 유성들이 유입되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 유성들은 앞서 말한 바와 같이 hellion source와 anti-hellion source로부터 유입이 되는 것이며 지구의 자전 효과로 인하여 시간에 따라 특정한 방향성을 가지고 유입이 될 것이다.

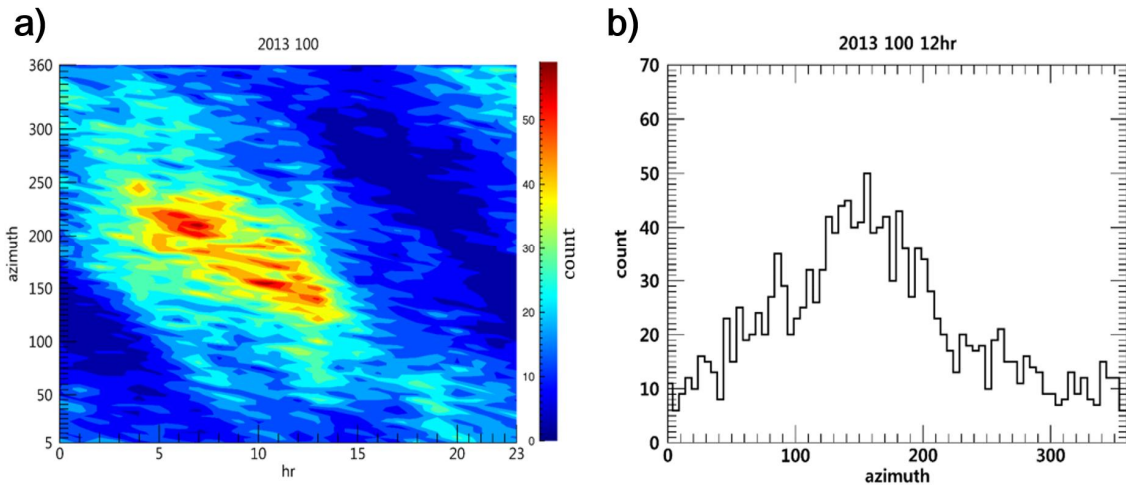


그림 2.16 2013년 day of year(DOY) 100일에 해당하는 유성의 개수를 (a) 시간과 방위각에 따라 나타낸 분포와 (b) 12~13시에 관측된 유성들의 히스토그램.

그림 2.16 a)는 2013년 100일에 관측된 유성들을 시간에 따른 방위각의 분포를 나타낸 것인 것 앞서 말한 바와 같이 특정 시간에 특정 방위각에서 유성이 많이 관측 되는 것을 볼 수 있다. 예를 들어 남반구에서 12LT와 같은 경우 태양이 북쪽에 위치해있다. 따라서 helion source로 유입이 되는 유성들은 대부분 북쪽과 서쪽 사이 방위각 330°인 지점에서 들어올 것이다. 이렇게 유입이 되는 유성들은 대부분 세종기지 유성레이더의 천정을 지나 동쪽과 남쪽 사이에서 관측이 될 것이다. 그림 2.16 b)는 12~13LT에 관측된 유성들의 방위각에 따른 개수 분포를 나타낸 그림인데 동쪽과 남쪽 사이 즉 방위각이 130°에서 170°사이에서 유성들이 많이 관측된 것을 확인 할 수 있다. 이러한 유성들은 세종기지 유성레이더의 천정을 지나 온 것이라고 가정을 할 수 있다. 따라서 우리는 이를 통해 시간에 따라 가장 많이 관측 된 방위각에서 $\pm 60^\circ$ 에 해당하는 유성들은 유성레이더의 천정을 지나 왔다고 가정을 하고 관측된 유성들의 천정각을 수평으로부터 측정한 대기 진입각이라고 가정을 하였다. 유성이 대기로 진입하게 되면서 삭마가 진행되게 됨에 따라 수 km의 길이와 대기의 평균 자유 행로 정도의 폭을 가진 원기둥 안에 전자들이 생성되게 된다. 여기서 생성된 전자 선 밀도의 양은 유성의 질량 손실률과 원자의 종류에 따라 변하는 효과적 전리계수 (effective ionization coefficient)인 β 와 비례를 한다. β 는 기화된 유성의 원자 당 생성된 전자의 수를 말하고 속도에 의해 결정이 되게 된다. Jones (1997) 에 따르면 2차이온화 또는 재결합이 일어나지 않는다고 가정을 하였을 때 유성의 속도가 35km/s 이하일 경우 효과적 전리계수는 이론적으로 식 (2.6)과 같을 수 있다고 하였다.

$$\beta \cong c(v - v_0)^2 v^{0.8} \quad (2.6)$$

여기서 c 는 적분 상수로 9.4×10^{-6} 의 값을 갖고 v 는 유성의 속력, v_0 는 더 이상 이온화가 일어나지 않는 한계 속도로 10km/s이다. 여기서 c 와 v_0 는 유성의 구성 원자에 따라 다르

지만 Jones (1997) 에서 유성의 성분을 몇 가지로 가정을 하였다. 또한 유성의 속력이 30에서 60.5km/s 사시인 것들에 대해서는 식 (2.7)에 따른다고 하였다.

$$\beta \cong 4.91 \times 10^{-6} v^{2.25} \quad (2.7)$$

그러면 생성된 전자 선 밀도와 유성의 질량 손실률, 효과적 전리 계수에 대한 관계는 속력이 V 라고 가정한 유성에 대해 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = -\frac{\beta}{\mu V} \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (2.8)$$

m 은 유성의 질량, μ 는 삭마된 유성 원자의 원자 질량, q 는 전자 선 밀도이다. 전자 선 밀도와 같은 경우 McKinley (1961) 에 나와 있는 방법을 통해 얻을 수 있다. 또한 Kim et al. (2012)와 같은 경우 전자 선 밀도에 따라 약한 에코와 강한 에코로 데이터를 나눠 더욱 정밀한 중간관계면 부근에서의 온도 추정을 가능하게 하였다.

또한 유성은 대기로 진입하게 되면서 두 가지의 힘을 받게 되는데 Öpic (1958)에 의하면 대기와의 마찰로 인한 감속과 지구의 중력으로 인한 가속이 있다고 한다. 따라서 유성이 대기로 진입하며 받는 전체 힘은 다음 식 (2.9)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{C_w A}{m^{1/3} \rho_m^{2/3} \rho_{air}} v^2 + \gamma \frac{M}{(R+h)^2} \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 C_w 는 대기 항력 계수로 Campbell-Brown and Koschny (2004) 에 따르면 자유 흐름(free flow) 지역에서는 관측된 유성에 대해 C_w 는 값이 1이라하고, A 는 유성의 형상 계수(shape factor)로 McKinley (1961) 은 유성이 구 형태의 조각이라 가정을 하였을 때 A 의 값은 1.21이라 하였다. 또한 ρ_m 과 ρ_{air} 는 각각 유성의 밀도와 배경 대기 밀도이고 v 는 유성의 속력, γ 는 중력 상수, m 과 M 은 각각 유성의 질량과 지구 질량이고 R 과 h 는 지구 반지름과 유성이 관측된 고도이다.

Stober et al. (2011)에 의하면 유성흔 안 전자들은 기본적으로 두 가지의 다른 물리적 과정으로 생성이 되는데 하나는 열적 삭마에 의해 생성이 되고 다른 하나는 스퍼터링(sputtering)이다. 하지만 스퍼터링 과정은 120km 위에서 일어나고 또한 McAuliffe and Christou (2006)에 의하면 매우 작고(~10 μ m) 빠른(~70km/s) 유성체에서만 나타난다고 하였기 때문에 우리는 스퍼터링에 의한 과정은 계산에서 제외하였다. 따라서 우리는 전자들이 오직 열적 삭마에 의해 생성된다고 가정하였고 열적 삭마 과정은 Campbell-Brown and Koschny (2004)에 따르면 클라우시스 클라페이론식(Clausius-Clapeyron equation)을 이용하여 식 (2.10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = -4A \left(\frac{m}{\rho m}\right)^{2/3} P_v(T) \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k_B T_m}} \quad (2.10)$$

여기서 k_B 는 볼츠만 상수, μ 는 보일링 매체(boiling medium)의 분자 질량, T_m 은 유성의 표면 온도이다. 또한 $P_v(T)$ 는 Pa단위로 포화 증기압을 나타낸다. 이 포화 증기압은 어떠한 유성이 대기 중 진입하는 동안 대기와의 마찰로 인해 유성의 표면이 결국 끓는 온도에 도달하게 되고 결국 기화가 되기 시작하는데 이 단계는 유성흔이 만들어지기 시작하는 단계이고 또한 증발은 포화 증기압에 도달할 때까지 지속이 된다. 이러한 포화 증기압은 클라우시스 클라페이론식에 의해 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log_{10} P_v - 1 = C_A - \frac{C_B}{T_m} \quad (2.11)$$

C_A 와 C_B 는 클라우시스 클라페이론 상수(Clausius-Clapeyron coefficient)로 물질에 따라 다른 값이 사용된다. Podolak et al.(1988)에 따르면 암석질 유성(Rocky meteor)과 같은 경우 C_A 는 13.176, C_B 는 24605K 을 사용하였다.

또한 유성 표면에서의 증발을 통해 에너지를 잃게 되는데 등온(isothermal)이고 균질(homogenous)의 유성이라고 가정하였을 때, Campbell-Brown and Koschny (2004)에 의하면 에너지 평형 방정식은 식 (2.12)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{2} A \rho_{air} v^3 = 4\epsilon\sigma(T_m)^4 - (T_{air})^4 + \frac{Cm^{1/3}\rho m^{2/3}}{A} \frac{dT}{dt} - \frac{L}{A} \left(\frac{\rho m}{m}\right)^{2/3} \frac{dm}{dt} \quad (2.12)$$

A 는 열전달 계수(heat transfer coefficient), ϵ 는 유성의 방사율(emissivity), σ 는 스테판 볼츠만 상수, T_m 과 T_{air} 는 각각 유성의 온도와 배경 대기 온도이다. 또한 C 는 열용량, L 은 증발에 의한 잠열이다. 식 (2.12)에서 각 항의 의미는 가장 왼쪽부터 차례대로 충돌에 의한 에너지, 가열 또는 냉각에 의한 복사, 축열(heat storage), 마지막 항은 증발과 융합에 의한 에너지이다. 여기서 Stober et al. (2011)는 축열항은 가열 또는 냉각에 의한 복사의 항에 비해 매우 작으므로 생략 후 시행한 시뮬레이션 결과는 여전히 합리적인 결과를 보인다고 하였다. 열전달 계수, 유성의 방사율, 열용량, 증발에 의한 잠열에 대한 값은 McAuliffe and Christou (2006)에서 석질 유성이라고 가정하였을 때의 값들을 사용하였다.

2.3 결과 및 토의

가. 관측된 유성의 온도, 질량, 가속도 분포

위 유성체 삭마 방정식들을 이용하여 관측된 유성의 표면 온도, 질량, 가속도를 추정하였다. 유성의 표면 온도는 에너지 평형 방정식인 식 (2.12)의 시간에 따른 질량변화율에 식 (2.10)과 식 (2.11)을 대입하게 되면 유성의 표면 온도에 대한 초월방정식(transcendental equation)을 얻을 수 있다. 이 초월방정식은 계수적 알고리즘을 통해 풀 수 있는데 Stober et al. (2011)에 따르면 100K의 오차가 있을 경우 유성의 질량이 3배 차이가 나게 된다고 한다. 따라서 우리는 유성의 표면온도를 1K씩 증가시키며 위의 초월방정식을 가장 잘 만족시키는 T_m 을 구하였다. 다음으로 위 과정을 통해 구한 유성의 표면 온도를 식 (2.10)에 대입하고 또한 식 (2.8)을 이용하여 시간에 따른 질량변화율을 소거하게 되면 관측된 고도에서의 유성 질량을 계산할 수 있다. 식 (2.8)에는 전자 선 밀도인 q 가 포함되어 있는데 현재 세종기지 유성레이더로는 전자 선 밀도의 절댓값을 알지 못하기 때문에 Kim et al. (2012)에서 사용한 방법으로 전자 선 밀도를 계산하였다. 마지막으로 계산된 질량을 식 (2.9)에 넣게 되면 관측된 고도에서의 유성 가속도를 계산할 수 있다.

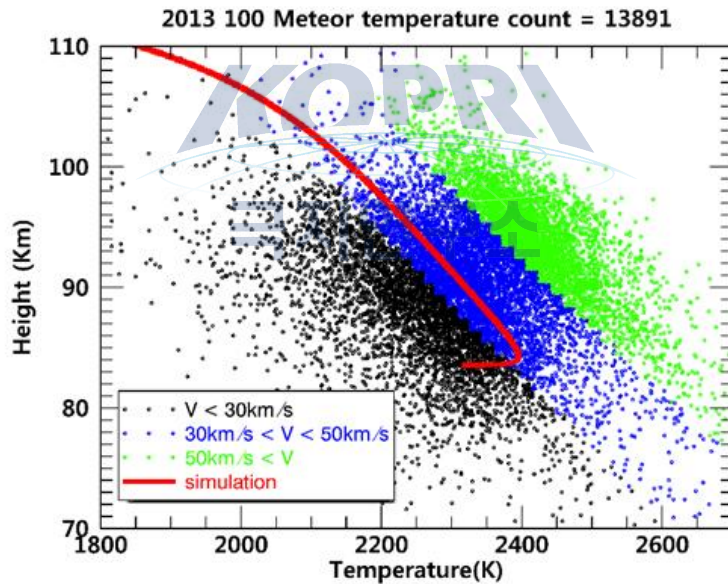


그림 2.17 2013년 4월 10일에 관측된 유성의 고도에 따른 유성의 표면 온도 분포

그림 2.17은 2013년 4월 10일 (day of year: 100일)에 세종기지 유성레이더를 통해 관측된 유성들에 대해 표면 온도를 계산한 그림이다. 이 날 총 관측된 유성의 개수는 27399개이지만 시간에 따라 특정 방위각 안의 데이터만을 사용하여 데이터의 개수가 총 개수의 절반 정도인 13891로 줄어들게 되었다. 전체적으로 고도가 낮아질수록 표면온도가 높아지는 모습을 볼 수 있고 이는 고도가 낮아질수록 높아지는 대기 밀도에 의해 더욱 많은 마찰이 발생하는 것으로 매우 합리적인 결과라고 할 수 있다. 또한 우리는 속도에 따라

30km/s 이하로 관측된 유성들은 검정색, 30km/s에서 50km/s 사이에 관측된 유성들을 파란색 50km/s 이상인 유성을 초록색으로 나타내었는데 동일한 고도에서 관측된 유성들을 비교해 보았을 때 속도가 더 빠른 유성들이 표면온도가 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 빨간 실선은 초기 질량이 $1.45 \times 10^{-6} kg$ 이고 초기 속도가 35km/s, 진입각이 45°인 유성을 10^{-4} 초의 시간 간격으로 계산한 결과이고 이 시뮬레이션 결과 주위에 파란색의 분포가 위치해있는 것을 볼 수 있다.

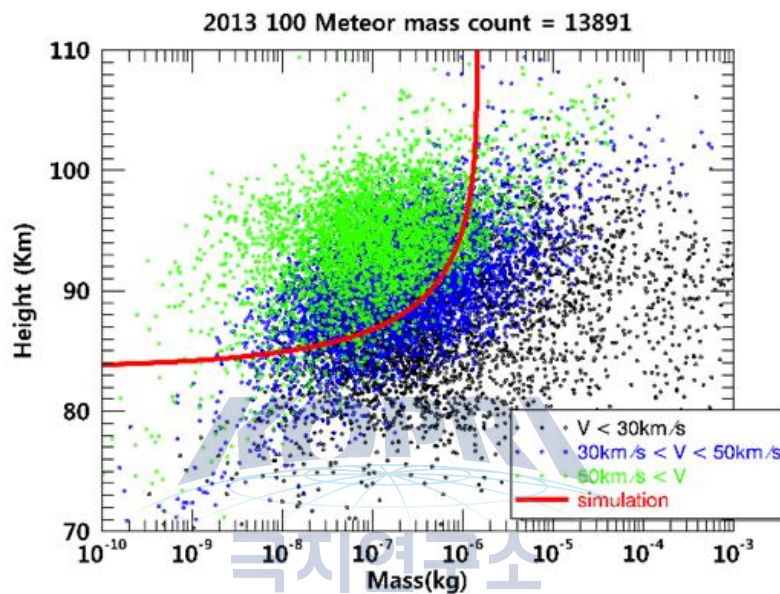


그림 2.18 2013년 4월 10일 관측된 고도에 따른 유성 질량 분포

그림 2.18는 그림 2.17에서 계산한 표면 온도를 이용하여 구한 유성의 질량 분포를 나타낸 것이고 마찬가지로 속도 따라 나누었다. 이 역시 시뮬레이션 결과인 빨간 실선 주위에 파란색 분포가 위치해있는 것을 볼 수 있고 뚜렷하게 나타나지는 않지만 고도가 낮아질수록 질량이 감소하는 모습을 볼 수 있다. 또한 대부분 관측된 유성의 질량 분포가 $10^{-9} kg$ 에서 $5 \times 10^{-5} kg$ 사이에 주로 있는 것을 확인 할 수 있는데 이는 Baggaley and Neslušan (2002)에서 말한 레이더가 얻을 수 있는 질량의 범위인 $10^{-10} \sim 10^{-6} kg$ 과 Campbell-Brown and Koschny (2004) 에서 언급한 범위인 $10^{-9} \sim 4 \times 10^{-5} kg$ 과 비슷하다.

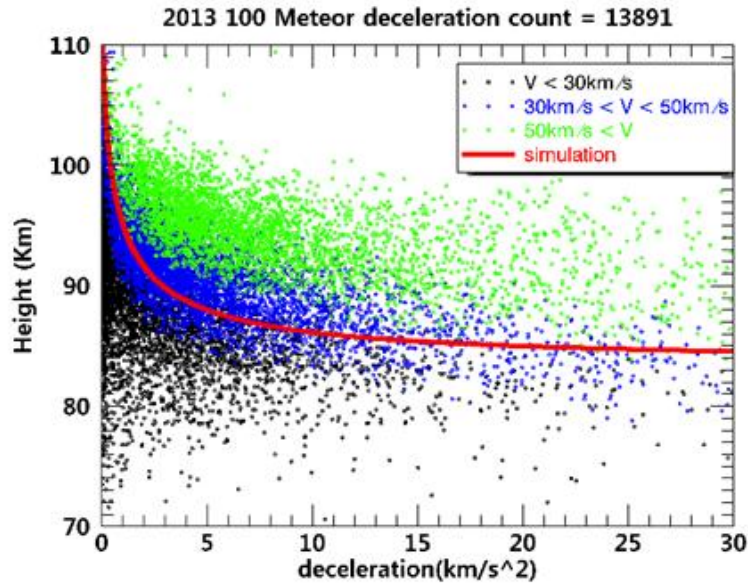


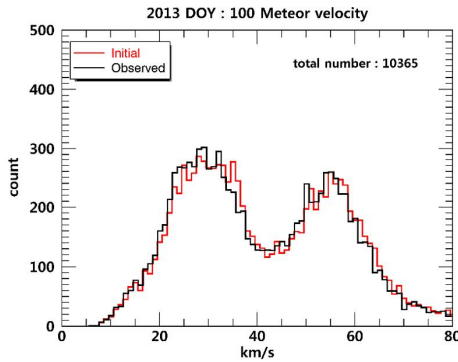
그림 2.19 2013년 4월 10일 관측된 고도에 따른 유성의 감속도 분포

그림 2.19는 그림 2.18에서 계산한 질량을 바탕으로 구한 관측된 유성의 감속도 분포를 나타낸 것이다. 속도가 빠른 유성들은 이미 다른 유성들에 비해 높은 고도에서 감속이 빠르게 진행되는 모습을 볼 수 있고 이 역시 시뮬레이션 결과와 파란색 분포가 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다.

나. 유성의 대기 진입 전 초기 질량 및 초기 속도

다음으로 우리는 더 이상 삭마가 일어나지 않는다고 가정한 고도 120km에서의 질량과 속도를 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 첫번째로 관측된 곳에서의 계산된 표면 온도, 질량, 속도를 식 (2.9)과 식 (2.10)에 대입시켜 dm 과 dv 를 계산하고 전 유성의 질량과 속도를 알아낸다. 그 후 유성의 속도와 진입각, dt 를 이용하여 dt 동안의 고도 변화를 계산한다. 다시 그 고도에서의 유성 표면 온도를 구하고 새롭게 얻어낸 표면 온도, 질량, 속도를 바탕으로 다시 dm , dt , dh 를 구하여 그 전 단계의 질량과 속도를 추정한다. 이와 같은 방식으로 고도 120km까지 진행을 하게 되면 해당 고도에서의 질량과 속도를 얻을 수 있게 된다.

a)



b)

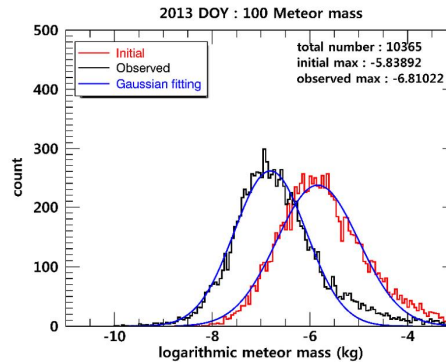


그림 2.20 세종기지 유성레이다로 관측된 2013년 4월 10일 a)유성의 관측된 속도와 유성 삭마 모델을 통해 구한 초기 속도 분포 b)유성의 관측된 질량과 유성 삭마 모델을 통해 구한 초기 질량 분포

그림 2.20은 유성 삭마 모델(ablation model)을 통해 계산한 유성의 초기 속도 및 초기 질량에 대한 히스토그램이다. 최종적으로 관측된 유성의 속도가 5 ~ 80km/s, 천정각이 20°이상 75°이하, 고도가 70km이상인 관측 결과를 사용하였기 때문에 데이터 수가 13891개에서 10365개로 줄어들게 되었다. 속도와 같은 경우 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있는데 이 날 관측된 유성의 평균 속도는 41.2km/s 이고 초기 속도의 평균은 41.9km/s로 평균적으로 대략 0.7km/s 증가하는 것을 볼 수 있다. 질량과 같은 경우에는 관측된 곳에서의 질량과 초기 질량 분포의 최대점이 $10^{-6.81}kg$ 에서 $10^{-5.83}kg$ 으로 약 10배정도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

다. 초기 질량, 속도, 진입각, 대기밀도가 관측되는 고도에 미치는 영향

유성의 초기 질량이나 속도, 대기로의 진입각, 대기의 밀도가 관측되는 유성의 고도에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 알아보기 위해 우리는 유성 삭마 모델을 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

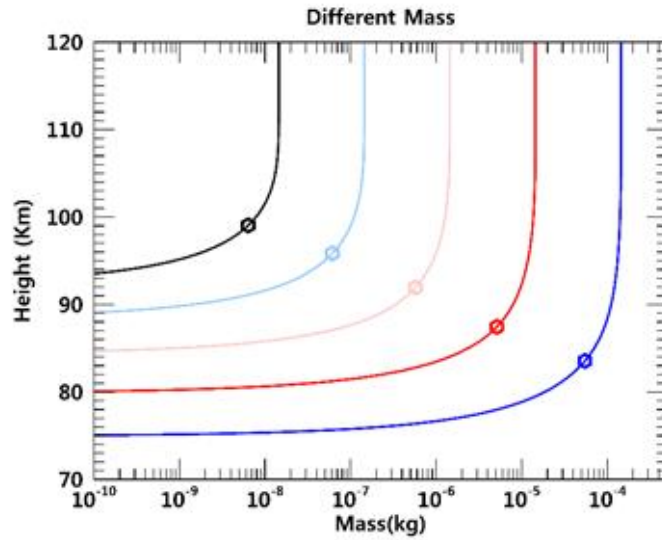


그림 2.21 초기속도는 30 km/s, 진입각을 45°로 설정하여 동일한 조건에서 서로 다른 질량을 가진 유성에 대한 시뮬레이션 결과 (심볼: 최대 전자 선밀도 지점).

그림 2.21은 동일한 대기 조건에서 초기 속도와 진입각도 30km/s, 45°로 고정 시킨 후 질량을 $1.45 \times 10^{-6} kg$ 을 중심으로 0.01배, 0.1배, 10배, 100배의 유성에 대하여 시뮬레이션 한 결과이다. Stober et al. (2012)에서 시뮬레이션을 진행할 때 전자 선 밀도가 최대인 지점을 관측되는 고도로 지정하였다. 그림 8에서 평균적으로 질량이 10배 차이가 나게 되면 관측되는 고도가 대략 3.9km 정도 차이 나는 것을 확인 할 수 있었다.

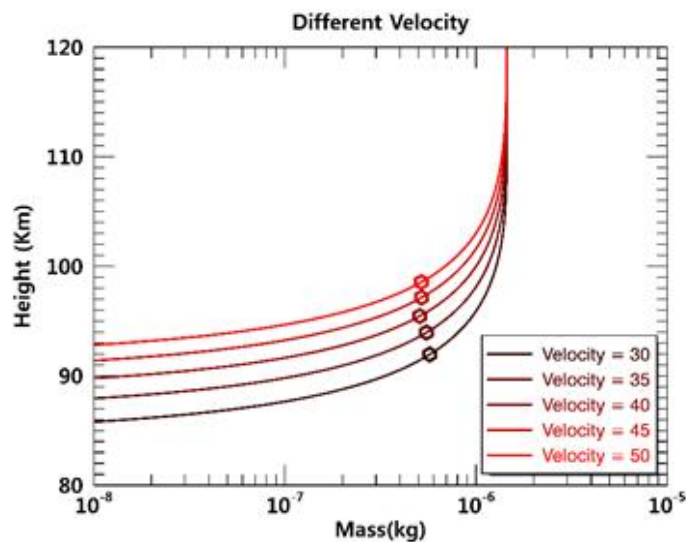


그림 2.22 초기 질량을 $1.45 \times 10^{-6} kg$, 진입각을 45°로 설정하여 동일한 조건에서 서로 다른 속도를 가진 유성에 대한 시뮬레이션 결과 (심볼: 최대 전자 선밀도 지점).

그림 2.22는 동일한 대기조건에서 초기 질량과 진입각을 고정 시킨 후 서로 다른 속도를 가진 유성들에 대하여 시뮬레이션을 한 결과이다. 속도가 5km/s 증가하게 되면 관측되는 고도가 약 1.62km 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.

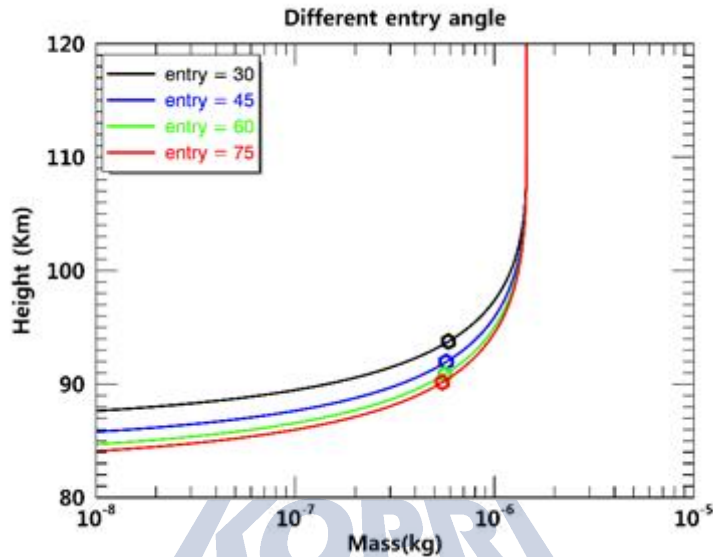


그림 2.23 초기 질량을 $1.45 \times 10^{-6} kg$, 초기 속도를 30km/s로 설정하여 동일한 조건에서 서로 다른 진입각을 가진 유성에 대한 시뮬레이션 결과 (심볼: 최대 전자 선밀도 지점).

그림 2.23은 나머지 조건은 동일하고 진입각을 바꿔가며 시뮬레이션 하였을 때의 결과인데 진입각이 15° 더 가파르면 관측되는 고도가 평균적으로 약 1.2km 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

위 네 가지 시뮬레이션을 통해 초기 질량에 따라서 관측되는 유성의 고도가 가장 많이 변한다는 것을 확인하였다. 또한 세종기지 유성레이더를 통해 얻은 고도에 따른 유성의 개수 분포에서 가우시안 피팅을 통해 얻은 전치반폭 (Full Width at Half Maximum; FWHM)은 대략 8 ~ 13km 인데 이는 초기 질량 분포의 FWHM에서 질량이 약 100배 차이가 나게 된다는 것으로 보았을 때 고도에 따른 유성의 개수 분포의 FWHM은 질량 분포에 의해 거의 결정되는 것 같다.

라. 초기 질량 분포와 대기 조건에 따른 관측 고도 변화

관측되는 유성의 고도에 따른 개수 분포가 초기 질량에 의해 많이 변하는지 아니면 계절에 따른 대기 조건에 의해 많이 변하는지 알아보았다.

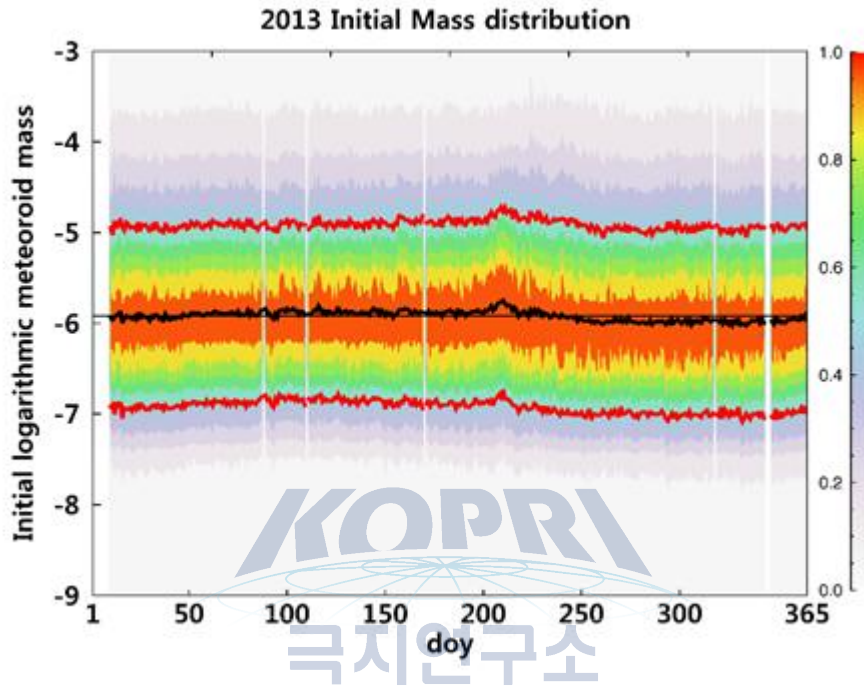


그림 2.24 2013년 세종기지 유성레이더에서 관측된 유성들의 초기 질량 분포, 검정색 실선: 최대 질량 지점, 빨간색 실선: FWHM의 상한값과 하한값

그림 2.24는 2013년 세종기지 유성레이더를 통해 관측된 유성을 바탕으로 계산한 초기 유성의 질량 분포들을 나타낸 것이다. DOY 210일 근처 Southern Delta Aquarid 유성우가 관측되었을 때를 제외하고 거의 일정한 분포를 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 우리는 계산을 통해 얻은 2013년의 초기 질량 분포의 최대 FWHM과 최소 FWHM에서 최대 질량을 가지는 유성과 최소 질량을 가지는 유성이 각각 여름철과 겨울철 대기를 만났을 때 관측되는 고도가 어떻게 달라지는지 확인해보았다. 2013년에서 가장 큰 FWHM은 DOY 236일에 약 2.2 으로 나타났고 가장 작은 FWHM은 DOY 82일에 약 1.9으로 보였다. 이 결과를 토대로 초기 질량 분포의 FWHM에서 큰 질량을 질량의 상한값(upper mass), 작은 질량을 질량의 하한값(lower mass)라고 하고 시뮬레이션을 진행하였다.

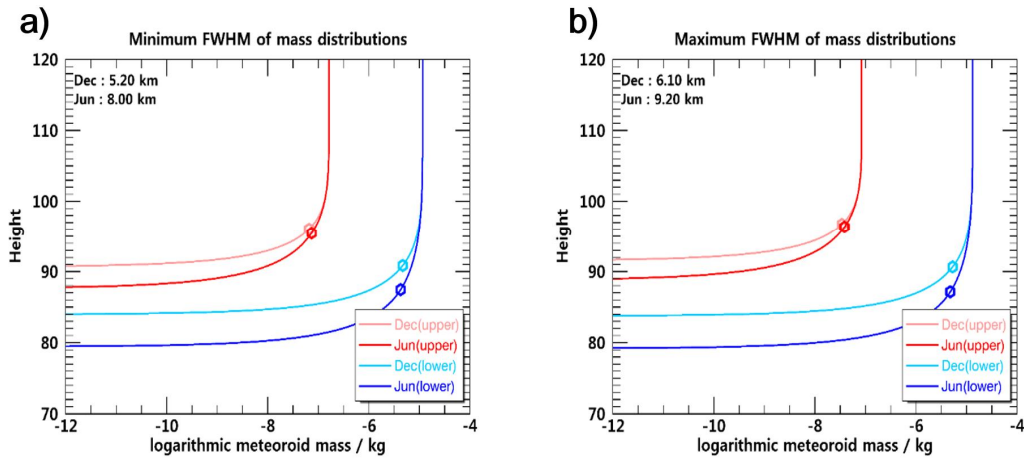


그림 2.25 a) 2013년 초기 질량 분포에서 최소 FWHM에 해당하는 upper mass와 lower mass를 여름철(12월)과 겨울철(6월)에 각각의 대기에 대해 시뮬레이션 한 결과, b) 최대 FWHM에 해당하는 질량을 여름철과 겨울철 대기에 대해 시뮬레이션한 결과.

그림 2.25은 초기 질량 분포에서 Minimum과 Maximum FWHM에서 upper mass와 lower mass에 해당하는 초기 질량과 30km/s의 초기 속도, 45°의 진입각을 가진 유성에 대하여 각각 다른 대기조건에서 시뮬레이션한 결과이다. Minimum FWHM에 해당하는 질량을 여름철(Dec)과 겨울철(Jun) 대기에 대해 시뮬레이션 한 결과 여름철 대기에서는 upper mass 와 lower mass의 초기 질량을 가진 유성이 관측되는 고도 차이가 약 5.2km이었고 겨울철 대기에서는 약 8.0km이었다. 또한 Maximum FWHM에 해당하는 질량을 여름철과 겨울철 대기에 대해 시뮬레이션 한 결과 여름철 대기에서 upper mass 와 lower mass의 초기 질량을 가진 유성이 관측되는 고도 차이가 약 6.1km였고 겨울철 대기에서는 9.2km이었다. 겨울철 대기에서 관측되는 고도의 차이가 더 큰 이유는 앞서 말한 바와 같이 이 지역에서 겨울철의 온도가 더 높기 때문에 대기가 팽창하여 이와 같은 결과가 나온 것이다. 또한 위 시뮬레이션을 통해 대기 조건에 의해 FWHM의 upper mass 와 lower mass 에 해당하는 유성이 관측되는 고도는 대략 3km정도 차이 나는 것을 볼 수 있지만 같은 대기 조건에서 Minimum과 Maximum의 차이는 약 1km 내외로 차이가 발생하는 것으로 보아 관측되는 유성의 고도는 대기 조건에 의해 거의 결정된다는 것을 알 수 있다.

제 3 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 북극 키루나 및 다산기지 OH 대기광 관측 자료 분석	1-1	북극 OH 대기광 온도 및 세기 자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 북극 키루나 FTS 관측 자료로부터 온도 및 세기 추출 - 천문관측스펙트럼 자료로부터 OH 대기광 온도 추출 - 대기광 온도 및 세기의 일변화 계절변화 연변화를 분석 - 국내외 학회 발표 및 논문 투고 	100%
2. 북극 에스랜지와 남극 세종기지 유성레이다 자료와 비교 분석	2-1	북극 Estringe 유성레이다의 자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 중간권 하부의 유성소멸시간 프로파일 분석 - 유성소멸시간으로부터 중간권 온도 추출 - 유성एको 분석으로 중간권 바람장 추출 	100%
	2-2	남극 세종기지 유성레이다의 자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 중간권 하부의 유성소멸시간 프로파일 분석 - 유성소멸시간으로부터 중간권 온도 추출 - 유성एको 분석으로 중간권 바람장 추출 - 학회 발표 및 논문 투고 	100%

학회발표 실적

1. Hosik Kam, **Yong Ha Kim**, Geonhwa Je, Young-bae Ham, In-Sun Song, "Analysis of propagating characteristics of mesospheric short period gravity waves observed at the Antarctic Peninsula", ANGWIN 2016, Cambridge, U.K., 2016.4.12.-4.14 (구두)
2. Gawon Kim, **Yong Ha Kim**, Youngsun Lee, Jeong-Han Kim, "A correlation study between mesospheric temperatures and indices of Arctic Oscillation (AO) and El-Nino southern Oscillation(ENSO)", 2016 한국 우주과학회 봄 학술대회, 4월 28-30일 (포스터)
3. Hosik Kam, **Yongha Kim**, Geonhwa Jee, Young-bae Ham, Won Seok Lee, "Propagation characteristics of mesospheric short period gravity waves over Antarctic Peninsula", 2016 한국 우주과학회 봄 학술대회, 4월 28-30일 (구두)

4. Gawon Kim, **Yong Ha Kim**, Youngsun Lee, Jeong-Han Kim, "An analysis of long-term trends in mesospheric temperatures from OH airglow spectra of Kiruna FTS and Sloan Digital Sky Survey", 2016 Joint CEDAR-GEM Workshop, Santa Fe, New Mexico, U.S.A., 2016.6.19.-6.24 (포스터)
5. Hosik Kam, **Yong Ha Kim**, Won Seok Lee, Nicholas Mitchell, Jeong-Han Kim, "Northern High-latitude Mesospheric Temperature Trends Driven from Esrange Meteor Radar, Kiruna, Sweden(67° 57'N, 20°13'E).", 2016 한국 우주과학회 가을 학술대회, 10월 26-28일 (구두)
6. Wonseok Lee, **Yong Ha Kim**, Changsup Lee, Jeong-Han Kim, "An Analysis of Meteor Altitude Distributions Observed by a Meteor Radar at King Sejong Station, Antarctica", 2016 한국 우주과학회 가을 학술대회, 10월 26-28일 (구두)
7. Changsup Lee, Jeong-Han Kim, Geonhwa Jee, Wonseok Lee, In-Sun Song, **Yong Ha Kim**, "A New Method for Temperature Estimation Near the Mesopause Region Using Meteor Radar", 2016 한국 우주과학회 가을 학술대회, 10월 26-28일 (구두)

논문실적

1. Mesospheric signatures observed during 2010 minor stratospheric warming at King Sejong Station (62°S, 59°W), S. Eswarajah, **Yong Ha Kim**, Junseok Hong, Jeong-Han Kim, M. Venkat Ratnam, A. Chandran, S.V.B. Rao, Dennis Riggini, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 140, 55-64 (2016. 2. SCI 교신저자)
2. Where does the plasmasphere begin? : Revisit to Topside Ionospheric Profiles in comparison with plasmaspheric TEC from Jason-1, Han-Byul Lee, **Yong Ha Kim**, Eunsol Kim, Junseok Hong, Young-Sil Kwak, J. Geophys. Res. accepted (2016. 9. SCI 교신저자)
3. A new method for temperature estimation near the mesopause region using a meteor radar, Changsup Lee, Jeong-Han Kim, Wonseok Lee, Geonhwa Jee, and **Yong Ha Kim**, Geophys. Res. Lett. accepted (2016. 10, SCI 공동저자)
4. Long-term trends of mesospheric temperatures over Kiruna (68°N, 21°E) and Apache Point Observatory (32°N, 105°W), Gawon Kim, Jeong-Han Kim, **Yong Ha Kim**, Youngsun Lee, submitted to JASTP (2016. 9., SCI 교신저자)
5. Statistical analysis of mesospheric gravity waves over King Sejong Station, Antarctica (62.2°S, 58.8°W) Hosik Kam, Geonhwa Jee, **Yong Ha Kim**, Young-bae Ham, and In-Sun Song, submitted to JASTP (2016. 10. SCI 교신저자)

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

북극 Kiruna 지역에 설치된 Esrange 유성레이다와 남극 세종기지에 설치된 유성레이다의 자료의 활용도는 높을 것으로 전망한다. 특히 Esrange 유성레이다와 남극 세종기지 유성레이더의 장기적으로 축적된 자료를 활용한 연구는 남·북극 고층대기의 온도 변화 추세 비교 및 중간권 상부의 다양한 역학적 특성을 비교할 수 있을 것이다. 이는 남·북극 고층대기의 차이점과 공통점을 살펴볼 수 있을 것이며, 각 극지방에서의 저층대기 상태와 관련성을 추적하는데 도움이 될 것이다. 특히 중간권 온도, 바람장, 파동 현상 등은 저층 대기의 상태와 관련성을 추적하는데 필수적으로 사용될 수 있으며, 자료 분석 기법을 독립적인 장비에 대해 적용하여 유성 레이더 자료 활용도를 높이는 기여를 할 수 있을 것이다.

북극 Kiruna 기지의 극지연 FTS 장기 관측 자료를 분석한 결과, 북극권 중간권이 장기적으로 냉각한다는 증거를 신뢰성 높은 학술지에 투고하여 검증을 받고 있다. 화석연료 사용에 따른 이산화탄소 증가는 저층대기의 온난화를 일으키는 반면, 중간권에서는 냉각화를 일으킬 것이라는 이론을 본 연구의 결과가 정량적으로 검증하는데 활용될 것이다. 특히 북극권과 중위도 중간권을 동시에 독립적인 관측 장비로 관측한 자료 분석 결과이므로 국제 학회에서 인정받을 것으로 기대된다. 또한 세종기지 유성레이더 자료 분석 결과는 저층 대기의 파동 현상이 중간권에 전파되어 밀도 및 온도 변화를 야기하는 과정을 정량적으로 연구하는데 활용될 것이다. 이는 저층대기와 고층대기간의 연계 과정을 이해하는데 필수적이다. 장기적으로 극지연구소의 고층대기관측 장비를 지속적으로 운영한다면 이와 같은 전지구 기후 변화 연구에 대해 우리나라가 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

제 5 장 참고문헌

- Aihara, H., et al., 2011, The eighth data release of the Sloan digital sky survey: first data from SDSS-III. *Astrophys. J. Suppl. S*, 193, 29-45.
- Ammosov, P., Gavrilyeva, G., Ammosova, A., Koltovskoi, I., 2014. Response of the mesopause temperatures to solar activity over Yakutia in 1999-2013. *Adv. Space Res*, 54, 2518-2524.
- Baggaley, W.J. and Neslušan, L., A model of the heliocentric orbits of a stream of Earth-impacting interstellar meteoroids. *Astronomy & Astrophysics*, 382 (3), 1118-1124.
- Baker, J.D., Stair, A.T., 1988. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow. *Phys. Scripta*, 37, 611-622.
- Bittner, M., Offermann, D., Graef, H.H., Donner, M., Hamilton, K., 2002. An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variation. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys*, 64, 1147-1166.
- Campbell-Brown, M.D. and Koschny, D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. *Astronomy and Astrophysics*, 418 (2), 751-758.
- Ceplecha, Z., Borovička, J., Elford, W.G., ReVelle, D.O., Hawkes, R.L., Porubčan, V., Simek, M., 1998. Meteor Phenomena and Bodies, *Space Science Reviews*, 84 (3), 327-471.
- Coxon, J.A., Foster, S.C., 1982. Rotational analysis of hydroxyl vibration-rotation emission bands: Molecular constants for OH, $6 \leq v \leq 10$. *Can. J. Phys*, 60, 11.
- Hocking, W.K., Thayaparan, T., Franke, S.J., 2001. Method for statistical comparison of geophysical data by multiple instruments which have differing accuracies. *Advances in Space Research* 27 (6-7), 1089-1098.
- Holmen, S.E., Dyrland, M.E., Sigernes, F., 2014. Long-term trends and the effect of solar cycle variations on mesospheric winter temperatures over Longyearbyen, Svalbard (78°N). *J. Geophys. Res*, 119, 6596-6608.
- Hall, C.M., Dyrland, M.E., Tsutsumi, M., Mulligan, F.J., 2012. Temperature trends at 90 km over Svalbard, Norway (78°N 16°E), seen in one decade of meteor radar observations. *J. Geophys. Res*, 117(D8), D08203.
- Hocking, W.K., 1999. Temperatures using radar-meteor decay times. *Geophysical Research Letters* 26 (21), 3297-3300.
- Hocking, W.K., Singer, W., Bremer, J., Mitchell, N.J., Batista, P., Clemesha, B., Donner, M., 2004. Meteor radar temperatures at multiple sites derived with SKiYMET radars and compared to OH, rocket and lidar measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66 (6-9), 585-593.

- Holdsworth, D.A., Murphy, D.J., Reid, I.M., Morris, R.J., 2008. Antarctic meteor observations using the Davis MST and meteor radars. *Advances in Space Research* 42 (1), 143-154.
- Jones, W., 1997. Theoretical and observational determinations of the ionization coefficient of meteors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 288 (4), 995-1003.
- Kaiser, T.R., 1954. Theory of the meteor height distribution obtained from radio-echo observations II. Sporadic meteors, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 114(1), 52-62.
- Kim, J.-H., Kim, Y.H., Lee, C., Jee, G., 2010. Seasonal variation of meteor decay times observed at King Sejong Station (62.221S, 58.781W), Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72, 883-889.
- Kim, J.-H., Kim, Y.H., Jee, G., Lee, C., 2012, Mesospheric temperature estimation from meteor decay times of weak and strong meteor trails, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 89. 18-26.
- Lee, C., Kim, J.-H., Jee, G., Lee, W., Song, I.-S., Kim, Y.H., 2016. New method of estimating temperatures near the mesopause region using meteor radar observations. *Geophysical Research Letters* 43 (20), 10580 -10585.
- Lowe, R.P., 2004. The temperature trend near the mesopause as measured using the hydroxyl airglow. *Eos Trans. AGU*, 85(17), Jt. Assem. Suppl, Abstract SA52A-03.
- McAuliffe, J.P. and Christou, A. A., 2006. Modelling meteor ablation in the venusian atmosphere. *Icarus*, 180 (1), 8-22.
- McKinley, D.W.R., 1961, *Meteor Science and Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Meinel, A.B., 1950. OH emission bands in the spectrum of the night sky. *Astrophys. J*, 111, 555-564.
- Offermann D, Hoffmann P, Knieling P, Koppmann R, Oberheide J, Steinbrecht W, 2010, Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics. *J. Geophys. Res.*, 115, D18127.
- Öpic, E. J., 1958. *Physics of meteor flight in the atmosphere*. Interscience, London.
- Perminov, V.I., Semenov, A.I., Medvedeva, I.V., Zheleznov, Y.A., 2014, Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over mid-latitude sites, Zvenigorod and Tory, Russia, *Adv. Space Res.*, 54, 2511-2517.
- Phillips, F., Burns, G.B., French, W.J.R., Williams, P.F.B., Klekociuk, A.R., Lowe, R.P., 2004. Determining rotational temperatures from the OH(8-3) band, and a comparison with OH(6-2) rotational temperatures at Davis, Antarctica. *Ann. Geophys.*, 22, 1549-1561.
- Podolak, M., Pollack, J.B., Reynolds, R.T., 1988. Interactions of planetesimals with

- protoplanetary atmospheres. *Icarus* 73 (1), 163-179.
- She, C.Y., Krueger, D.A., Yuan, T., 2015., Long-term midlatitude mesopause region temperature trend deduced from quarter century (1990-2014) Na lidar observations. *Ann. Geophys*, 33, 363-369.
- Sivjee, G.G., 1992. Airglow hydroxyl emissions. *Planet. Space Sci*, 40, 235-242.
- Sigernes, F., Shumilov, N., Deehr, C.S., Nielsen, K.P., Svenøe, T., Havnes, O., 2003. Hydroxyl rotational temperature record from the auroral station in Adventdalen, Svalbard (78°N, 15°E). *J. Geophys. Res* 108, A9, 1342.
- Singer, W., Bremer, J., Hocking, W.K., Weiss, J., Latteck, R., Zecha, M., 2003. Temperature and wind tides around the summer mesopause at middle and arctic latitudes. *Advances in Space Research*, 31 (9), 2055-2060.
- Singer, W., Bremer, J., Weib, J., Hocking, W.K., Hoffner, J., Donner, M., Espy, P., 2004. Meteor radar observations at middle and Arctic latitudes Part 1: Mean temperatures. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66 (6-9), 607-616
- Stober, G., Jacobi, Ch., Frohlich, K., Oberheide, J., 2008. Meteor radar temperatures over Collm (51.31N, 131E). *Advances in Space Research*, 42 (7), 1253-1258
- Stober, G., Jacobi, C., Singer, W., 2011. Meteoroid mass determination from underdense trails. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (9), 895-900.
- Stober, G., Jacobi, C., Matthias, V., Hoffmann, P., Gerding, M., 2012. Neutral air density variations during strong planetary wave activity in the mesopause region derived from meteor radar observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 74, 55-63.
- Stoughton, C., et al., 2002. Sloan digital sky survey: early data release, *Astron. J*, 123, 485-548.
- Taylor, A.D. and Elford, W.G., 1998. Meteoroid orbital element distributions at 1 AU deduced from the Harvard Radio Meteor Project observations. *Earth, planets and space*, 50 (6), 569-575.
- Won, Y.I., Chung, J.K., Lee, B.Y., Kim, Y., Kim, J., Kim, J.B., 1999, An Application of a Michelson Interferometer to Measurements of OH Rotational Temperatures. *J. Korean. Phys. Soc.* 34. 344-349.
- Won, Y.I., Cho, Y.M., Niciejewski, R.J., Kim, J., 2001. Observations of OH(3,1) airglow emission using a Michelson interferometer at 62°S, *Adv. Space Res*, 27, 1165-1170.
- Won, Y.I., Lee, B.Y., Kwon, S.C., 2004. Characteristics of atmospheric waves observed from airglow measurements in the northern high-latitude. *J. Astron. Space Sci*, 21, 101-108.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 연구 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 위탁연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.