

중간권 계면에서의 온도와 바람의 계절 변화

최기혁 · 홍용식

인하대학교 항공경영관리연구소

데이빗 리즈 · 빈센트 위크와

유타주립대 천문우주과학센터

SEASONAL VARIATIONS OF WIND AND TEMPERATURE AT THE MESOPAUSE

Gi-Hyuk Choi, Yongsik Hong

Aerospace Management Research Centre, Inha University

David Rees, Vincent B. Wickwar

Centre for Atmosphere & Space Science, Utah State University

(Received May 1, 1997; Accepted May 22, 1997)

요 약

중간권 계면(고도 85km)은 중간권과 열권의 경계면으로 활발한 유체역학적 운동과 화학반응에 의한 대기 발광현상이 일어나는 흥미로운 곳이다. 그러나 직접 측정의 어려움으로 그 동안 많은 연구가 있지 못하였다. 본 연구에서는 중간계면 87km 고도에서 발생하는 수산기의 대기발광(843nm)을 지상 파브리-페로 간섭계로 측정하여 도플러 온도와 바람 속도를 측정하였다. 2년간에 걸친 장기간의 연구로 이 곳의 계절적 온도 변화가 지상의 온도 변화와 반대 경향인 것을 확인할 수 있었고, 남북-동서 방향의 바람 속도는 각각 연 1회, 연 2회 변화하는 것을 밝혀내었다. 이러한 온도와 바람의 계절적 변화는 대규모 반구간 대류 운동의 결과로 여겨진다.

ABSTRACT

The Mesopause (85km) is the boundary between the Mesosphere and the Thermosphere and is a very interesting region because there are active fluid dynamic motions and airglow phenomena due to various chemical reactions. But there have been not many studies due to the difficulties of insitu measurement. However in this study we have obtained the Doppler temperatures and winds through the observing Hydroxyl(OH) emission at 843nm using a ground-based Fabry-Perot interferometer. Due to the 2 years of long term observation, we can confirm the seasonal Mesopause temperature variation, which is the opposite trend against the temperature at the ground level, and

reveal annual and biannual variations for meridional and zonal wind respectively. These seasonal variations might be the result of the inter-hemispheric circulation.

1. 서론

지상 85km 부근에 위치한 중간권 계면(Mesopause)은 중간권(Mesosphere)과 열권(Thermosphere)과의 경계면으로 다양한 유체역학적 현상과 화학반응 그리고 이로 인한 대기발광(Airglow) 현상등이 관측되는 흥미로운 곳이다. 그러나 비교적 최근에서야 이 중간권 계면이 지구의 내부 대기권(고도 100km 이하)과 외부 대기권 사이의 에너지 이동 통로임이 밝혀졌다 (Killeen *et al.* 1991). 에너지 이동의 가장 중요한 요인은 상부 성층권(30 ~ 50km)에서의 오존 가열(Ozone Heating)에 의한 중간권에서의 지구 규모(Global Scale)의 대류 순환(Convective Circulation) 운동이다. 이외에도 중력파(Gravity Wave)와 조석 운동(Tidal Motion)에 의한 대류권(Troposphere)과 하부열권(Lower Thermosphere) 사이의 에너지 전달이 최근에 제기되고 있지만 아직까지 정량적인 연구는 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

중간권은 관측의 사각 지대(Dead Zone)이다. 기구(Balloon)가 도달할 수 있는 고도는 최고 40km이고 인공위성은 고도 200km 이하로는 내려오지 못하기 때문이다. 유일한 직접 관측 방법인 Sounding Rocket, 그리고 Radar나 Lidar를 이용하는 방법은 장비의 가격과 운용 비용이 고가이므로 장기간에 걸친 관측에는 부담이 된다. 그러나 다행히 중간권 계면에서는 여러 가지 대기발광 현상이 있는데 이들을 지상에서 광학 간섭계(Optical Interferometer)로 관측하면 경제적으로 장기간에 걸친 중간권 계면에 대한 연구를 수행할 수 있다. 여러 대기발광 중에서도 수산화기(Hydroxyl; OH)는 적외선을 100 KRay 정도로 가장 강하게 내고 또한 발광층도 얇은 두께(10km FWHM)에 집중되어 있어, 중간권 계면 연구에 적당한 장점을 갖고 있어 본 연구의 관측 대상으로 택하였다.

중간권에서의 오존 가열에 의한 대규모 대류 순환은 1940년대 Brewer(1949) 등에 의해 그 존재가 예측되었고 “반구간 대류 운동(Inter-hemispheric Circulation)”으로 알려져 왔다. 지금까지 그 존재에 대해 의심하지 않았으나 실제적인 관측 증거가 거의 없었다. 이는 중간권에 대한 관측의 어려움과 또한 1년 이상에 걸친 장기간의 자료 축적이 필요하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 중간계면에서의 OH 발광 관측을 장기간(2년) 수행하여 이 곳에서의 바람과 온도 변화를 알아보고, 이를 토대로 중간권 대류운동을 정량적으로 밝히고자 하였다.

2. 관측과 자료분석

관측 장비는 UCL(University College London)과 Utah State University간의 공동 연구로 파브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer)를 제작하여, Utah주 Bear Lake Observatory(41.9°N, 111.4°W)에 설치하였다. 회전 Mirror를 통하여 하늘의 8개 방위가 300km 직경의 원주상에 위치하며, 그 각각은 5.5km 직경의 Measuring Volume을 갖게 된다. 이때의 Field of View는 1°를 갖게 되며 각 방위

당 Integration Time은 240초이다. 이 여덟개 방향의 하루 저녁 관측 자료들을 모두 평균하여 이날의 Data Point를 얻을 수 있다.

파브리-페로 간섭계에서 얻어진 스펙트럼은 심한 잡음을 포함하고 있고 여러 물리적 계수들이 동시에 변하므로, 원하는 물리적 계수들을 한번에 얻기 위해 비선형 다변수 최소자승법(Non-linear Multi Parameter Least-Squares Method)을 사용하였다.

OH 스펙트럼의 이론적 함수는 Maxwell 분포에서 온도와 도플러 이동(Doppler Shift), 그리고 신호 강도 등의 함수로 아래식 (1)과 같이 나타내진다(McCartney 1983).

$$G(\lambda) = S \frac{C}{\lambda_0} \left(\frac{m}{2\pi\kappa T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{mC^2\lambda_0^2}{2\kappa T} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)^2 \right] d\lambda \quad (1)$$

여기에서 S 는 적분 신호 강도, m 은 OH분자의 질량, λ 는파장, λ_0 는 중심 파장(843nm), κ 는 볼츠만 상수, C 는 빛의 속도, T 는 온도를 나타낸다.

이 이론적인 모델링 함수는 간섭계의 고유 특성함수(Instrument Function, or MTF(Modulation Transfer Function))와 Convolution된 후 관측 데이터와 비교하게 된다.

$$R = [Y - G(\lambda) \otimes I]^2 \quad (2)$$

여기서 Y 는 관측 데이터, I 는 간섭계의 고유특성함수를 나타낸다. 이때 식 (2)에서 오차의 제곱 R 이 최소가 되도록 하는 여러 물리 계수들을 얻을 수 있다.

3. 중간권 계면에서의 온도 변화

중간권 계면에서의 온도는 지금까지 주로 OH 분자의 Rotational 온도를 측정하여 얻어졌다 (Mulligan *et al.* 1995). OH 분자는 수 많은 발광선(Emission Line)을 갖고 있는데 분자의 내부 에너지, 즉 온도에 따라서 그 상대적 강도의 비가 변하므로 이를 관측하여 얻어진 온도를 Rotational 온도라 한다. 그러나 이는 간접적인 방법으로 정확도가 떨어지는 단점이 있고, 더우기 장기적인 관측은 드물었다. 온도의 물리적 정의는 분자나 원자의 운동 에너지의 정도이다. 분자의 내부 에너지(회전이나 진동)와 운동 에너지는 근사적으로 같다고 여겨지지만, 이를 통해 실제 온도를 계산하는 것은 간접적인 것으로 어느 정도의 오차는 피할 수 없다.

보다 직접적이고 정확한 OH 분자의 온도를 측정하기 위해서는, 분자의 열운동 때문에 발생하는 발광선의 도플러 확장(Doppler Broadening)을 측정하여, 도플러 온도(Doppler Temperature)를 계산하여야 하지만 스펙트럼의 복잡성과 데이터 처리의 어려움으로 장기간의 관측은 없었고 불과 며칠간의 관측도 최근에 이루어졌다(Hernandez *et al.* 1992, Conner *et al.* 1993). 한 OH 스펙트럼의 도플러 온도를 측정하기 위해서는 식 (2)를 사용하는데 이 때 온도 이외의 다른 계수들도 동시에 계산된다. 하루 저녁에는 평균적으로 100여개의 스펙트럼이 얻어지는데, 매 스펙트럼마다 오차가 수렴할 때까지 ~ 100번 정도의 반복 계산이 필요하고 매번마다 퓨리에 변환과 최소자승의 계산이 필요하다. 따

라서 이러한 데이터 해석에는 정확하고 효율적인 소프트웨어와 고속 컴퓨터의 도움을 필요로 한다. 이러한 이유로 OH 분자의 도플러 온도 계산은 Hernandez에 의해 1992년에야 처음으로 이루어 졌다. 본 연구에서는 새롭게 개발된 소프트웨어(Choi 1996)를 이용하여 직접적인 OH 분자의 온도를 발광선의 도플러 확장을 측정하여 얻었고, 2년에 걸친 장기적인 변화를 관측하였다.

중간권 계면에서의 온도 변화는 지상의 변화와는 정반대의 경향을 보인다는 것이 이미 알려져 있다 (She et al. 1993, Mulligan et al. 1995, Choi 1996). 이 현상은 여름철의 상승류에 의한 단열팽창과, 겨울철의 하강류에 의한 단열압축이 그 원인이라고 알려져 왔으나 정확한 증거는 제시되지 못하였다. 왜냐하면 중위도 지역의 중간층에서의 대기의 상승-하강 속도는 평균적으로 수 내지 수십 cm/sec의 크기로 직접적인 관측이 매우 어렵기 때문이다(Geller 1983).

그림 1에서 최고 온도는 1994년 3월에 $223.9 \pm 1.6K$, 최저 온도는 1995년 7월에 $150.0 \pm 1.5K$ 이고 3월에서 7월 사이 봄철의 냉각은 $-12.5 K/월$ 로서 8월과 12월 사이의 가을철 가열 $8.3 K/월$ 보다 기울기가 급하다. 지금까지 다른 연구(East et al. 1995)에서는 달이 뜬 밤이나 구름이 낀 밤에 얻은 부적절한 데이터를 모두 버림으로써 데이터의 밀도가 3~4일에 1 point 정도였으나 본 연구에서는 수많은 시도를 통하여 적절한 기준을 정하여 좋지 않은 데이터를 찾아내어 자동적으로 버리고 선별하는 알고리즘을 개발하여 운용한 결과 데이터의 밀도를 2.8일에 1 point정도로 높일 수가 있었다(Choi 1996).

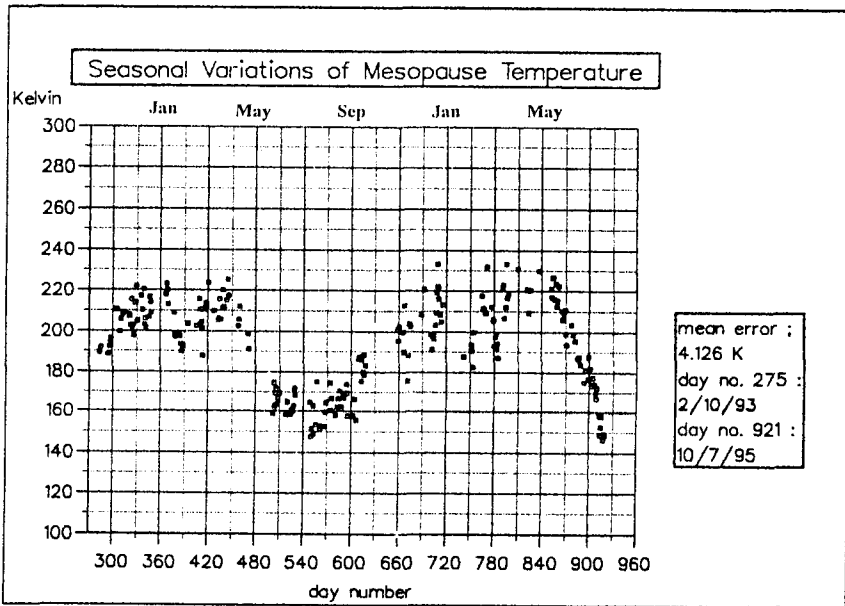


그림 1. OH 분자의 Doppler Broadening 측정을 통한 중간권 계면에서의 온도 변화.

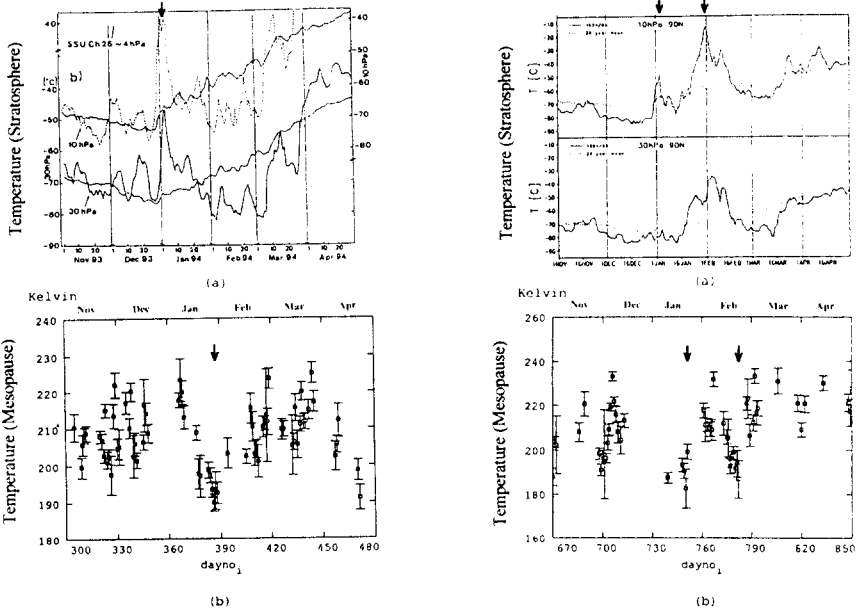


그림 2. 성층권 가열 현상과 중간권 계면 냉각과의 관련.

그 결과 중간권 계면에서의 온도 변화가 지금까지 알려진 바와 같이(She *et al.* 1993, Mulligan *et al.* 1995) Sine 혹은 Cosine 모양의 부드러운 변화뿐만 아니라 한겨울에 갑자기 20 ~ 30K 정도 온도가 떨어지는 현상을 수반함을 처음으로 발견하였다. 이는 약 20일전에 북극권 지역의 성층권에 있었던 갑작스러운 성층권 가열(Sudden Stratospheric Warming) 현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다. 이 온도 강하 현상은 1994년 1월과 1995년 1, 2월에 3번 발생하였는데 이 때 모두 북극권 성층권에 성층권 가열 현상이 약 20일전에 관측되었다(그림 2).

4. 중간권 계면 바람의 계절적 변화

중간권 계면에서의 바람 변화는 남북(Meridional) 방향은 연 1회(Annual) 동서(Zonal) 방향은 연 2회(Semiannual) 변화를 갖는 것이 기본적인 특징이다. 그 중 남북 방향의 바람은 여름 반구에서 겨울 반구로 부는데, 이것이 반구간 대류 운동의 가장 확실한 증거이다(그림 3). 여름 하지 때에 최대 ~ 60m/sec의 남향풍이 불고, 겨울 동지 때에 최대 ~ 20m/sec로 북향풍이 분다.

동서 방향의 바람은 여름과 겨울철에 동향풍이 불고 춘.추분의 짧은 기간 중에 서풍으로 급격히 변하는 흥미로운 변화를 보여준다(그림 4). 최대 동향풍은 하지와 동지 근처에서 30m/sec정도이고, 반면에 서향풍은 춘분과 추분을 전후해서 25m/sec 정도이다. 이 변화에 대한 만족할 만한 설명은 아직 없지만 성층권의 바람과 관련이 있다고 여겨지고 있다. 지금까지 적도 지역의 성층권에서 이 현상

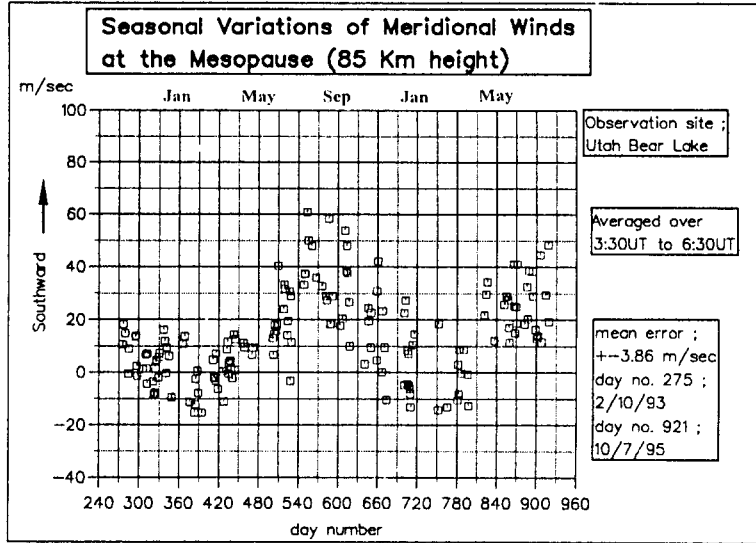


그림 3. OH 분자의 Doppler Shift 측정을 통한 중간권 계면에서의 남북방향 바람 속도의 변화.

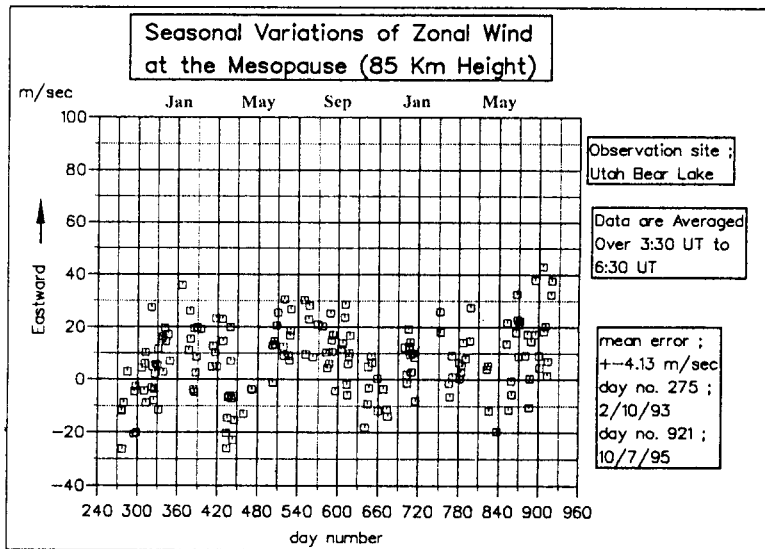


그림 4. OH 분자의 Doppler Shift 측정을 통한 중간권 계면에서의 동서방향 바람 속도의 변화.

이 관측되었는데, 이는 1년에 두 번 춘, 추분 때 태양이 적도를 수직으로 비추면서 적도 방향으로 온도 구배를 만들어 위도 30° 이하의 준적도 지역(Subtropical Region)에 동향풍을 만들고 또 한 겨울에 행성파(Planetary Wave)의 영향이 더해져 일어난다고 보고있다(Labitzke & Barnett 1973, Fritz 1974). 또한 상부 성층권(고도 50km) 부근은 고도 90km 부근의 중간권 계면과 동서 방향의 바람이 반대로 연계되어 있다는 것은 오래 전부터 알려져 왔다(van Loon *et al.* 1972, Labitzke 1972). 이러한 상반된 연계(Anti-correlation)는 중력파(Dunkerton 1982)와 조석 운동의 영향(Choi 1996)으로 여겨진다. 그러나 위도 44° 인 중위도 지역에서의 이 같은 현상은 본 연구에서 처음 관측되었는데, 이에 대한 만족할 만한 설명은 아직 없는 실정이다.

5. 결론 및 토의

북반구 중위도 중간권 계면에서의 온도는 알려진 바와 같이 여름에 저온(~ 160K), 겨울에 고온(~ 220K)인 것이 확인 되었다. 한겨울인 1월과 2월에 중간권 계면의 온도가 갑자기 20 ~ 30K 정도 떨어지는 현상이 처음으로 관측되었는데 이는 극 지역 성층권의 급격한 가열 현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다.

남북 방향의 바람은 여름 반구에서 겨울 반구로 부는 것이 관측 되었는데 이는 반구간 대류 운동의 직접적인 증거이다. 동서 방향의 바람은 동지와 하지 때에 동향풍이 불고, 춘·추분 때에는 짧은 기간 바람이 서향으로 바뀌는 현상이 관측되었다. 중위도 지역에서의 이러한 현상은 준적도 지역 성층권의 바람과 중력파 및 조석 운동이 관련된 것으로 보이지만, 결론을 내리기 위해서는 좀더 많은 관측이 필요하다.

이상의 연구에서 밝혀진 중간권 계면의 온도와 남북 방향 바람의 변화에서 중간권에는 반구간의 대규모 대류 운동이 존재하고 있음을 알 수 있고, 이러한 대류운동을 통하여 막대한 에너지가 출입하고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- Brewer, A. W. 1949, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 75, 351
 Choi, G. H. 1996, Ph. D. Thesis (London University: London)
 Conner, J. F., Smith, R. W. & Hernandez, G. 1993, *Appl. Opts.*, 32, 23, 4437
 Dunkerton, T. J. 1982, *J. Atmos. Sci.*, 39, 2681
 East, S. A., Meredith, N. P., Harris, M. J., Rees, D., Wickwar, V. B., Monson, I. & Muller, H. G. 1995, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 9, 995
 Fritz, S. 1974, *J. Atmos. Sci.*, 31, 813
 Geller, M. A. 1983, *Space Sci. Rev.*, 34, 359
 Hernandez, G., Smith R. W. & Conner, J. F. 1992, *Geophys. Res. Letts.*, 19, 1, 53

- Killeen, T. L., Brace, L. H., Forbes, J. M., Fritts, D. C., Heelis, R. A., Llewellyn, E. J., Mayr, H. G., Meng, C. I., Robble, R. G., Rush, D. W., Russel III, J. M., Szuszczewics, E. P., Torr, M. R. & von Zahn, U. 1991, *Thermosphere-Ionosphere Energetics and Dynamics (TIMED)*; The TIMED mission and science program, Report of the science definition team, Volume 1: Executive summary, National Aeronautics and Space Administration (NASA)
- Labitzke, K. 1972, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1395
- Labitzke, K. & Barnett, J. J. 1973, *J. Geophys. Res.*, 18, 3, 483
- McCartney, F. J. 1983, *Absorption and emission by atmospheric gases* (John Wiley & Sons: New York)
- Mulligan, F. J., Horgan, D. F., Galligan, J. G. & Griffin, E. M. 1995, *J. Atmos. & Terr. Phys.*, 57, 13, 1623
- She, C. Y., Yu, J. R. & Chen, H. 1993, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 7, 567
- van Loon, H., Labitzke, K. & Jenne, R. Y. 1972, *J. Geophys. Res.*, 77, 21, 3846