

과학 1, 2호 로켓 실험을 통한 성층권 오존량 측정

이기영¹·이동훈¹·김준²·박창준³·조희구⁴

¹경희대학교 우주과학과

²항공우주연구소 우주사업단

³표준과학연구원 화학 방사선 연구부

⁴연세대학교 천문대기과학과

OZONE MEASUREMENTS IN THE STRATOSPHERE FROM KSR420S-1 AND -2

K. Y. Lee¹· D. H. Lee¹· J. Kim²· C. J. Park³· H. K. Cho⁴

¹Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University

²Space R & D Division, Korea Aerospace Research Institute

³Chemistry & Radiation Division, Korea Research Institute of Standards and Science

⁴Department of Astronomy and Atmospheric Science, Yonsei University

(Received March 5, 1994; Accepted May 16, 1994)

요 약

오존 측정기를 장착한 과학 1, 2호 로켓이 충청남도 안흥에서 1994년 6월 4일과 9월 1일에 각각 발사되었다. 오존 측정기로 성층권에서의 태양 자외선의 세기를 여러 파장대역에서 측정하여 성층권 고도의 오존 수밀도의 수직 분포를 구하였다. 오존 밀도의 최대값은 약 25 km 근처에서 나타났으며, 오존 밀도의 분포는 중위도 지역에서의 기존 측정값들과 잘 일치하였다. 또한 위 로켓 실험 관측 자료를 당시 관측된 연세대의 돕슨 분광기, 경희대의 LIDAR, Nimbus 위성의 SBUV와 NOAA 위성의 TOVS 측정 자료들과 각각 비교하였다.

ABSTRACT

The Korean sounding rockets(KSR420S-1, -2) equipped with ozone detectors have been launched at An-heung, Chungchungnam-do, on June 4 and September 1, 1993, respectively. The ozone detector is used to measure the attenuation of solar UV radiation for various frequency bands in the stratosphere, to obtain vertical profiles of the ozone number density in the stratosphere. They

confirm that the maximum ozone densities occur near 25 km, which is quite consistent with the mean value in the mid-latitude region. Our results from KSR420S-1 and -2 are compared with the other observational data from the Dobson spectrophotometer at Yonsei Univ., the LIDAR at Kyunghee Univ., the SBUV from Nimbus satellite, and the TOVS from NOAA satellite, which were performed simultaneously with the sounding rocket experiments.

1. 서 론

성층권의 총 오존량은 지구의 총 대기량의 백만분의 1 이하로 극히 작지만, 지구상의 생물에 미치는 영향은 매우 중요하다. 성층권의 오존층은 태양 자외선에 의해 생성되어 존재하지만, 해로운 자외선을 또한 흡수함으로써 생물을 보호해 준다.

이러한 오존층은 1946년 V-2 로켓에 의해 처음으로 증명되었으며, 1960년대 말 성층권 초음속기(Supersonic Transport; SST)의 개발에 따른 연구에 의해 오존층에 대한 많은 성질이 알려졌다(Shimazaki 1987). 그러나 지난 1985년 남극 오존홀의 문제가 제기되면서, 오존층의 오존량 감소 문제가 매우 부각되었다(Farman *et al.* 1985).

현재까지 한반도의 오존층 관측은 연세대의 돕슨 분광기(Dobson Spectrophotometer) 및 경희대의 LIDAR(Light Detection and Ranging)등을 통하여 수행되고 있으나(조희구의 1988, Park *et al.* 1994), 이들은 간접적인 지상관측방법이므로 정확도가 비교적 떨어진다. 직접적인 관측 방법에는 기구(balloon)를 이용한 방법과 로켓을 이용한 방법이 있는데, 기구는 30 km 밖에 올라가지 못하므로 그 이상의 고도는 로켓에 의존해야만 한다. 반면에 0 ~ 20 km 사이에서는 로켓보다는 기구가 정확한 값을 주게 된다. 이번에 항공우주연구소에서 개발된 과학 로켓(Korean Sounding Rocket: KSR420S)과 표준과학연구원에서 제작된 오존 측정기를 이용한 직접적인 오존층 관측이 한반도 상공에서 처음으로 이루어졌다(류장수의 1993, 박창준외 1993, Kim *et al.* 1992). 로켓 관측에는 자외선 측정법, 화학 형광법, 그리고 ECC(Electrochemical cell)를 이용한 방법 등이 있으나, 과학 1, 2호에서는 이 방법들 중에서 정확도가 가장 높은 자외선 측정법을 이용하였다(이기영 1994).

과학 1, 2호 로켓은 1993년 6월 4일과 9월 1일에 각각 발사되어 관측을 수행하였다. 그리고 동시에 지상 관측기기(돕슨 분광기, LIDAR)를 이용한 관측과 위성 관측기기(TOVS, SBUV)를 이용한 관측이 이루어졌다. 이 논문에서는 로켓 관측자료를 이용하여 한반도 상공의 오존의 고도별 분포를 구하고, 다른 방법의 관측자료들과 비교할 것이다.

2. 오존 측정기

2.1 기기

이번에 사용된 오존 측정기는 복사계측기 (radiometer), 전원부 (battery), 회로부 (circuit part), 태양 센서 (sun-sensor)로 구성되어 있다. 측정하는 파장밴드에 따라 총 4 개가 사용되는 복사계측기는 석영창 (quartz window), 간섭필터 (interference filter), 광튜브 (phototube)로 이루어 지는데, 광튜브에서 나오는 전류는 전압으로 변화시켜 주는 증폭기 (amplifier)에 최단 거리로 연결되어야만 잡음을 최소화시킬 수 있으므로 광튜브 바로 뒤에 전류-전압 변환기 (I/V converter)를 부착시켰다 (그림 1). 그리고 간섭필터는 각각 255, 290, 310, 450 nm의 중심파장을 가지는데, 이 중에서 450 nm 채널은 대기의 흡광을 거의 받지 않는 채널이므로, 로켓의 자세보정을 하는데 사용된다 (Watanabe 1986). 이번 실험에서 255, 290, 310 nm의 간섭 필터는 일본 진공 광학사의 Type S를, 450 nm의 경우에는 같은 회사 제품의 Type A를 사용하였다. 그리고 광튜브는 Hamamatsu 제품으로 각각 Type R765와 Type R414를 사용하였다.

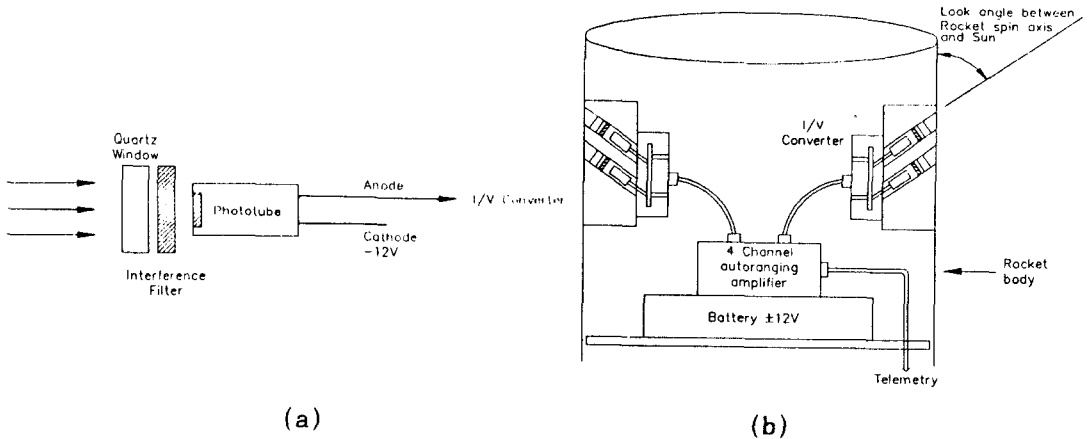


그림 1. (a)오존 복사계측기의 구조와 (b)탑재부에 설치된 오존 측정기 시스템. 4개의 복사계측기는 탑재부에 2개의 채널씩 180° 간격으로 설치하여 태양빛을 측정하게 하였다.

전원부는 $\pm 12\text{ V}$ 를 공급하며, 회로부는 6단계의 이득 (gain)을 주는 자동 조절 증폭기 (autoringing amplifier)를 이용하여 측정 범위를 늘렸으며, 출력 신호는 0 ~ 5 V의 값으로 출력하여 원격 송신부 (telemetry)로 넘겨 주게 된다. 회로 구성의 순서도는 그림 2에 잘 나타나 있다. 태양 빛이 광튜브에 도달하면 전류가 흐르게 되고, 전류-전압 변환기의 출력값은 2^{2n} , ($n=0, 1, \dots, 5$)배의 자동 변환 이득을 주는 자동조절 증폭기에 입력된다.

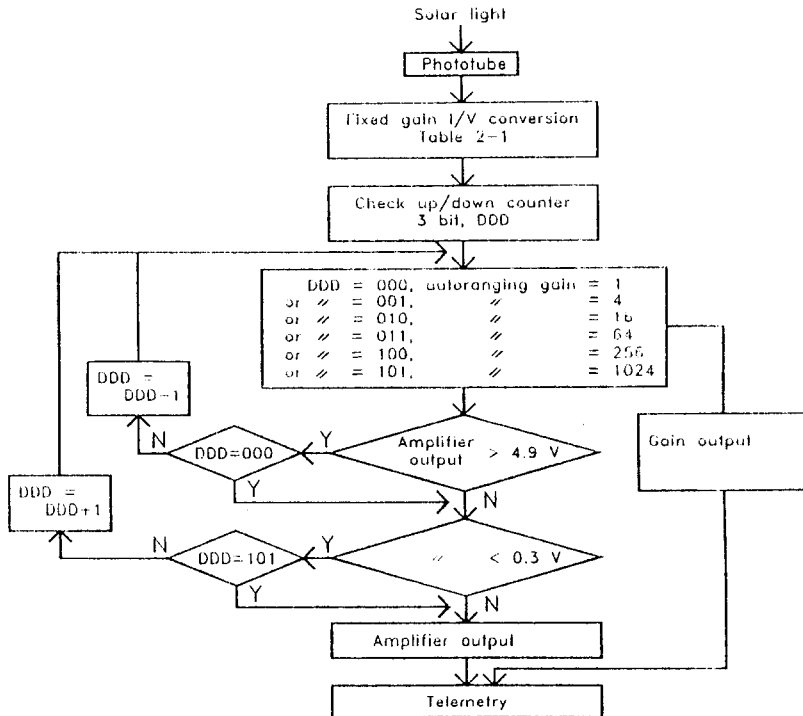


그림 2. 오존 측정기 회로부 순서도.

자동 조절 증폭기는 아날로그 출력값 (analog output)이 4.9 V를 넘으면 이득을 1/4로 감소시키고, 반대로 0.3 V이하가 되면 이득을 4배로 증가시킨다. 태양 센서는 로켓 기축과 태양 사이의 각도를 측정하기 위해 탑재되었다. 로켓은 기축에 대해 초당 3~4 회전하므로 로켓과 태양 사이의 각도는 1차원 측정으로 간단해진다. 이 각도를 측정하기 위해서 46개의 소자로 되어 있는 광다이오드 배열 (photodiode array)을 이용하였다. 이러한 태양 센서로부터는 로켓의 회전수와 자세에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

2.2 보정

계산 과정에서 파장에 대한 반응 함수(response function)가 필요하므로 각각의 간섭 필터에 대해 보정(calibration)을 해야 된다. 그리고 복사계측기가 항상 수직한 빛을 받는 것이 아니므로, 입사각의 변화에 따르는 필터의 특성 곡선도 고려해야 한다. 표준과학연구원 분광연구실의

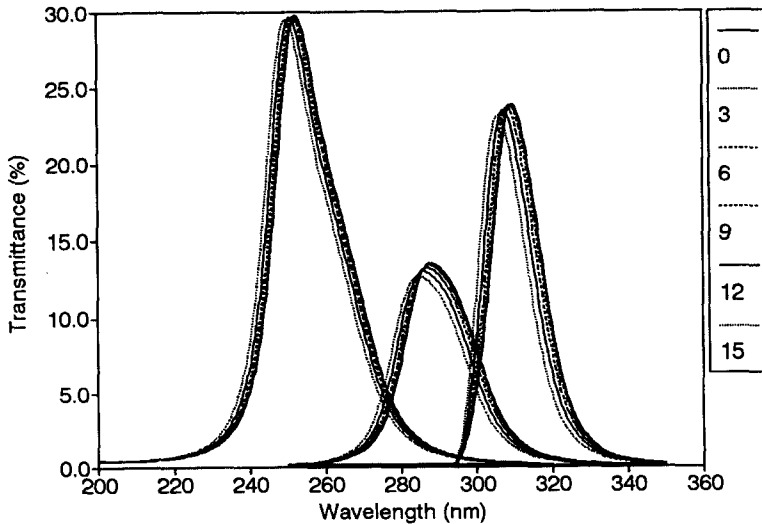


그림 3. 255, 290, 310 nm 간섭필터들의 빛의 입사각 변화 ($0^\circ \sim 15^\circ$ 까지 3° 간격)에 따른 투과율.

CARY 5E Spectro-photometer를 이용하여 보정한 결과가 그림 3에 있다. 각 필터에 대해 빛의 입사각도를 $0^\circ \sim 15^\circ$ (여기서, 0° 는 필터면에 수직할 경우)까지 기울여 본 결과, 특성 곡선이 단파장쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 간섭 필터에 의해 선택되는 파장은 빛이 입사하는 각도의 코사인(cosine)값에 비례하기 때문에, 이러한 경향은 간섭 필터 고유의 특성과 잘 일치하는 결과이다(Meyer-Arendt 1984). 보통 입사각이 15° 정도 기울어짐에 따라 최대값 파장은 약 5 nm 정도 짧아지며, 최대 투과효율은 약 2 ~ 3% 줄어드는 것을 볼 수 있다.

이번 실험에서는 광튜브를 이용하여 태양 자외선의 세기를 측정하므로 광튜브의 특성 곡선도 구해야 한다. 그러나 계산 과정에서는 상대적인 세기의 비(ratio)만을 이용하기 때문에 특성곡선의 절대값은 필요치 않다. 그러므로 파장에 대한 광튜브의 반응 함수만을 구하였다. 여기서 빛의 세기 변화에 대한 반응 함수의 선형성은 보장된다고 가정하였다. 보정은 표준과학연구원 광학 연구실에서 수행되었다(그림 4). 보정한 결과가 그림 5에 있는데 약 220 nm에서 최대 반응을 나타내는 것을 볼 수 있다.

2.3 환경 시험

로켓이 발사될 때 로켓에 실린 탑재물들은 엄청난 가속도를 받는다. 그러므로 탑재물이 발사 순간 및 모터 연소 동안의 환경을 견딜 수 있는지를 알아보기 위해서는 로켓에 실리기 전에 미리

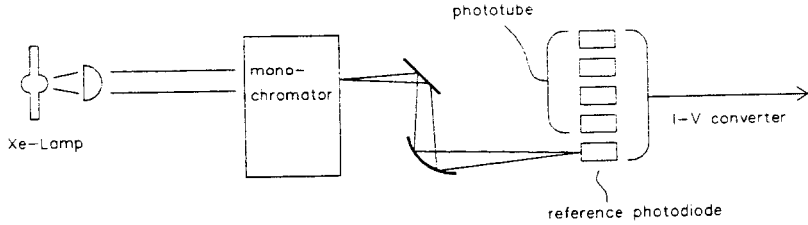


그림 4. 광튜브 보정 시스템. Xe-lamp로부터 나온 빛을 단색광으로 만든 후에, 기준 광다이오드와 각각의 광튜브에 번갈아 비추어 보정하였다.

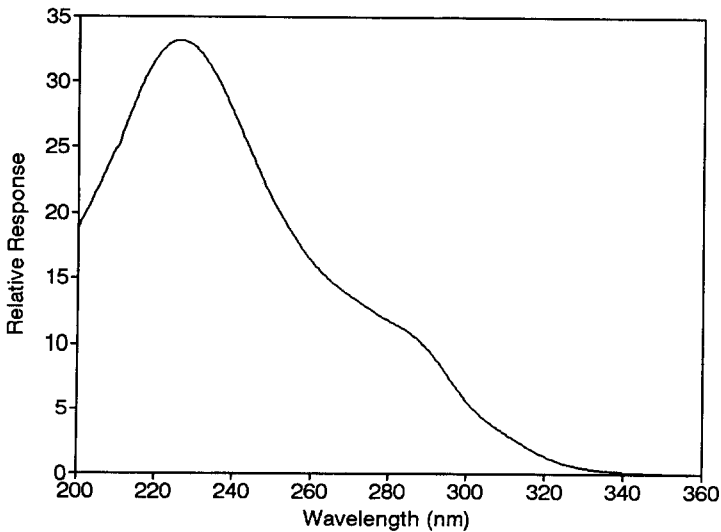


그림 5. 광튜브 반응 함수. 광튜브는 220 nm 근처에서 최대 반응을 나타낸다. 그리고 Y 축의 값들은 임의의 값들이다.

진동 및 충격 시험을 거쳐야 한다. 또한 지상 10 km 이상에서는 대기가 희박하므로 지상과는 다른 진공 환경에 접하게 된다. 탑재물들은 보통 전자 장비이므로 진공 방전이 일어날 수도 있기 때문에 진공 시험 또한 거쳐야 한다. 그리고 로켓과 공기와의 마찰열도 문제가 될 수 있으나 마찰열이 내부에 있는 장비까지 전도되기에는 다소 시간이 걸릴 것이고, 오존 측정기의 외피(case)는 모두 알루미늄으로 되어 있지만, 필터나 광튜브, 전원부 등은 모두 테플론(teflon)으로 보호하여 높

은 열은 받지 않도록 하였다. 그러므로 열환경 시험을 제외하고, 진동, 충격, 그리고 진공 시험만을 하였다.

• 진동 및 충격 시험

진동 시험은 오존 측정기를 탑재부(payload)에 부착하여 실험하였다. 실험은 0 - 12 G까지 예비시험(pretest)과 총 4단계로 약 2분 동안 실험하였는데, 실험치는 표 1에 잘 나타나 있다. 이 실험의 rms 가속도는 약 5.2 G 정도이다. 그리고 충격시험(shock test)에서는 3번의 충격을 주어서 실험하였는데 별 무리없이 잘 견디는 것을 볼 수 있었다.

표 1. 진동과 충격 시험

진동 시험		진동 주파수(Hz)	Density(g ² /Hz)
	1 단계	20 ~ 900	0.002
2 단계	900 ~ 1600	0.01	
3 단계	1600 ~ 1800	0.06	
4 단계	1800 ~ 2000	0.03	
충격 시험		duration(ms)	가속도(G)
	1	7.953	10.351
	2	7.770	27.542
	3	8.2	39.7

표 2. 진공 시험

Time (sec)	Pressure (torr)
0	760.0
240	80.0
420	8.5
520	2.6
590	1.1
690	0.35
750	0.19
840	0.08
870	0.06

• 진공 시험

진공 방전을 막기 위하여 전자 회로판 위를 실리콘으로 몰딩을 한 후 실험하였다. 진공 시험은 항공우주연구소의 열진공 실험실에서 Dynavac사의 열진공 챔버(Thermal Vacuum Chamber)를 이용하였다. 이 실험에서 압력값은 760 torr에서부터 시작하여 약 70 km 높이에서의 압력인 0.05 torr까지 약 15분 동안 실험하였다(표 2). 실험한 결과, 큰 잡음은 볼 수 없었고, 진공 방전 현상도 나타나지 않았다.

3. 자료 처리 알고리즘

오존의 고도별 분포를 구하는 계산 과정에 있어서 한 가지 가정은 대기층이 편평(plane-parallel)하며, 수평적으로는 대기 성분의 변화가 없다는 것이다. 측정하는 자외선 파장 영역에서는 주로 오존 기체만이 흡광을 하므로, Lambert-Beer's law는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = I_0 \cdot \exp(-\sigma_{O_3} \cdot N) \quad (1)$$

여기서, I_0 는 매질에 입사하기 전의 빛의 세기, I 는 입사 후의 빛의 세기, σ_{O_3} 는 오존의 흡수 단면적, N 은 오존의 기둥밀도(column density)이다. 윗 식은 매질의 흡수만을 고려한 식이므로 산란에 의한 효과도 고려해 주어야 한다. 맑은 날 관측을 하므로 여러 가지의 산란 효과중에서 대기층에 의한 산란 효과가 가장 크다. 그러므로 Rayleigh 산란 효과를 (1)식의 지수항에 넣어서 계산해야 한다. 보통 이 Rayleigh 산란 효과는 30 km 이하에서 매우 유효하다. 그리고 측정기가 받는 빛의 세기는 간섭 필터의 투과율과 광튜브의 감도(sensitivity), 그리고 각 고도에서의 빛의 세기의 곱으로 이루어 진다. 그러므로 (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{I(z)}{I_0(z = \infty)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot S(\lambda, \theta) \cdot \exp[-\sigma_a(\lambda, T^*) \cdot N(z) - \sigma_R(\lambda) \cdot M(z)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot S(\lambda, \theta) d\lambda} \quad (2)$$

여기서, $I(z)$: 각 고도에서 측정된 빛의 세기

$I_0(z = \infty)$: 지구 대기권 밖에서 측정된 빛의 세기

$F(\lambda)$: 지구 대기권 밖의 태양 조도(solar irradiance)

$S(\lambda, \theta)$: 각 복사계측기의 반응함수 (간섭 필터 투과 곡선 광튜브 반응 곡선)

$\sigma_a(\lambda, T^*)$: 오존의 흡수 단면적

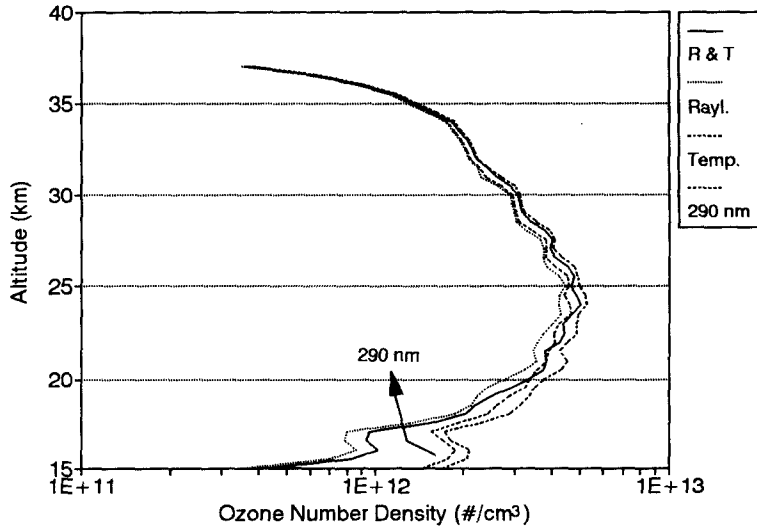
T^* : 오존량 고도분포가 가중된 온도

$\sigma_R(\lambda)$: Rayleigh 산란 단면적

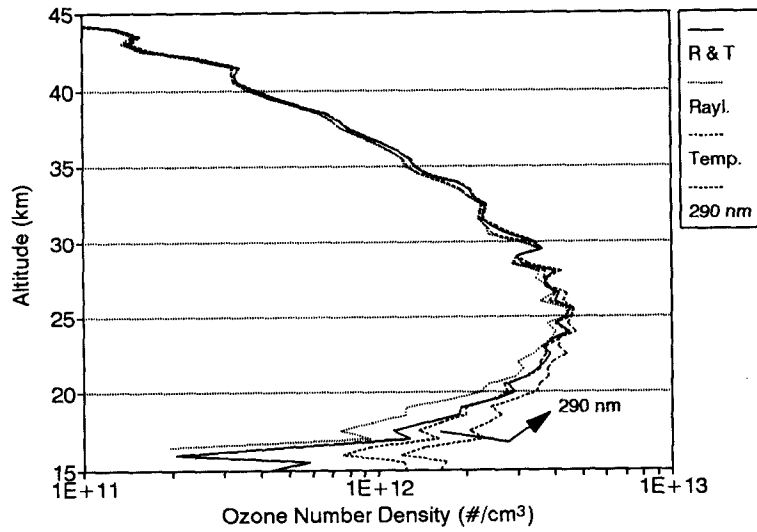
$M(z)$: 총 대기량의 경사기둥밀도(slant column density)

$N(z)$: 오존의 경사기둥밀도

λ_1, λ_2 : 각 복사계측기의 파장 대역폭(bandwidth)



(a) 과학 1호



(b) 과학 2호

그림 6. 온도와 Rayleigh 산란 효과. 여기에서 R & T는 Rayleigh 산란 효과와 온도를 모두 고려한 것이고, Rayl.는 Rayleigh 산란 효과만, Temp.는 온도만을 고려한 것이다.

윗 식에서 분자의 지수항에 Rayleigh 산란에 의한 효과와 오존 흡수 단면적의 온도에 의한 효과가 고려되었는데, 이 두 가지의 효과가 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해서 각각의 효과를 고려하지 않았을 때의 결과를 그림 6에 나타내었다. 일반적으로 온도가 낮아지면 오존의 흡수 단면적은 작아지고(Molina and Molina 1986), Rayleigh 산란의 효과를 고려하면 대기 밀도가 높은 낮은 고도에서 오존의 양이 감소한다. 특히 고도에 따른 온도를 고려할 경우, 오존의 기동밀도가 자외선을 흡수하므로, 오존량 고도분포가 가중된 온도를 적용해야 한다. 온도를 고려하지 않았을 경우에 상온(298 K)에서의 자료를 사용하였으므로 온도의 효과를 고려한다면, 결과적으로 그림에서와 같이 더 많은 오존량을 나타내게 된다. 또한 Rayleigh 산란 효과를 보면, 대기 밀도가 높아질수록, 즉 고도가 낮아질수록 더 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

이번 계산에서는 자외선 영역(200 ~ 350 nm)을 측정하는 것이기 때문에, I_0 는 지구 대기권을 완전히 통과한 높이를 말하는 것이 아니라 오존층을 완전히 통과한 높이를 말한다. 즉, 약 70 km이상의 고도에서 측정된 로켓 관측 자료를 사용하면 된다. 그러나 이번 관측에서는 로켓의 최대 도달 고도가 낮았기 때문에 I_0 값을 구할 수 없었다. 따라서 계산식을 다음과 같이 수정하였다.

$$\frac{I(z)}{I_0(z_0)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot S(\lambda, \theta) \cdot \exp[-\sigma(\lambda, T^*) \cdot N(z) - \sigma_R(\lambda) \cdot M(z)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot S(\lambda, \theta) \cdot \exp[-\sigma(\lambda, T^*) \cdot N(z_0)] d\lambda} \quad (3)$$

여기서, z_0 는 최대 세기의 높이이다.

(3)식은 (2)식과 달리 분모에 지수항이 새로 들어갔는데, 이는 z_0 이상의 고도에 존재하는 오존에 의해 이미 빛이 흡수되었다고 가정한 식이다. 그러므로 $N(z_0)$ 에는 각 채널마다 최대세기가 구해진 높이의 기동밀도가 사용되었다. 이 기동밀도값은 Brasseur and Solomon(1986)의 값을 이용하였다. 이렇게 새로 수정된 식을 이용할 경우, 자료 처리 과정이 $N(z_0)$ 의 값에 얼마나 의존하는지를 보기 위하여, 2호기 자료 처리 과정에서 $N(z_0)$ 값 대신에 $0.7 \times N(z_0)$ 와 $1.3 \times N(z_0)$ 의 값을 대입하였을 때의 계산 결과를 비교해 보았다. 그림 7에서 나타나듯이 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 1호기의 결과도 비슷하였다. 그러므로 본 자료 처리 알고리즘은 각각 39 km, 49 km 높이에서 선택된 $N(z_0)$ 의 값에 크게 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다.

(3)식에서 좌변은 실제 측정값이 되고, 우변은 이론적인 계산값이 된다. 그러므로 가능한 경사기동밀도($1 \times 10^{14} - 9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$)에 대해 미리 상대적인 세기의 비를 계산할 수 있다. 이렇게 구한 곡선에 의해 실제로 측정된 값으로부터 오존의 경사기동밀도를 구할 수 있다. 대기의 두께가 지구 반지름에 비해 매우 작기 때문에, 보통 태양 천정각이 60° 이내일 때는 지구의 곡률을 고려하지 않아도 된다. 즉 대기를 편평하다고 가정하였으므로 오존의 수밀도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$n(z) = -\cos \theta \cdot \frac{dN(z)}{dz} \quad (4)$$

위의 계산과정에서 오존의 흡수단면적은 세 온도(226, 263, 298 K)에서 측정된 자료인 Molina and Molina(1986)의 자료를 이용하였는데, 세 온도 이외의 자료값은 Lagrange 보간법을 사용하

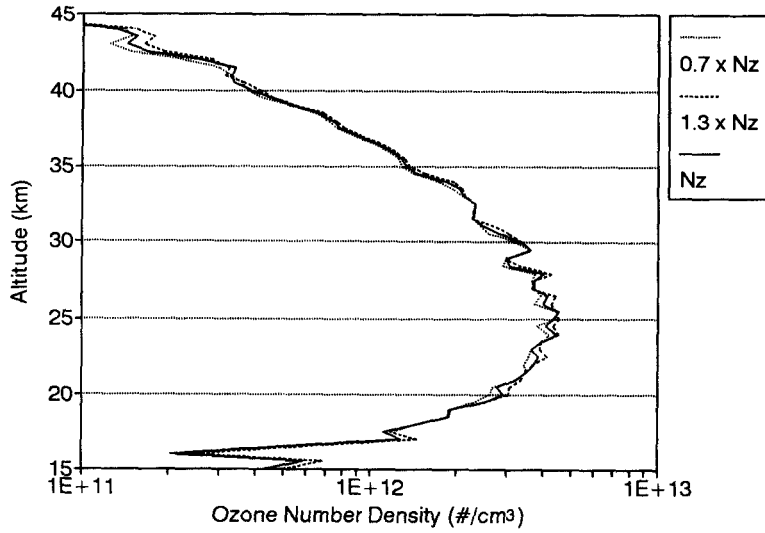


그림 7. 기둥밀도 $N(z_0)$ 에의 의존성 (과학 2호, 290 nm).

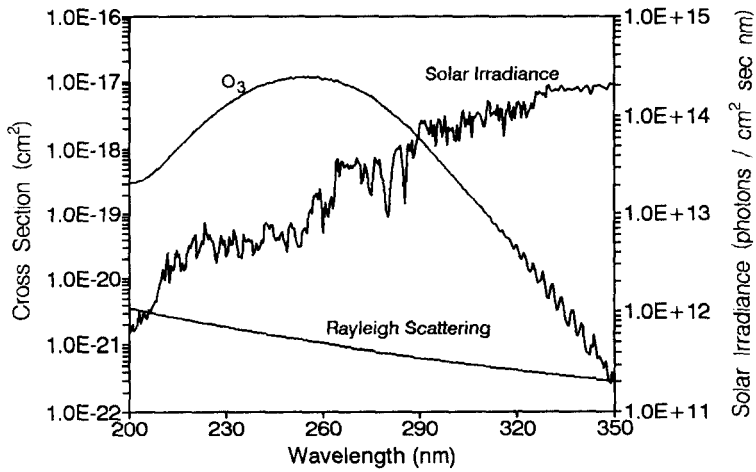


그림 8. 흡수, 산란 단면적과 태양 조도. Rayleigh 산란 단면적은 10^4 배 확대되어 있다. 태양조도의 자료는 Mentall *et al.* (1981)과 Thekaekara(1974)로부터, 오존 흡수 단면적과 Rayleigh 산란 단면적은 각각 Molina and Molina(1986)와 Penndorf(1957)의 자료를 이용하였다.

여 계산하였다. 그리고 지구 대기권 밖의 태양 조도 자료는 200 ~ 350 nm 영역 사이의 자료가 필요하므로, 200 ~ 330 nm까지는 Mentall *et al.* (1981)의 자료를, 그 이후는 Thekaekara(1974)의 자료를 이용하였고, Rayleigh 산란 단면적은 Penndorf(1957)의 자료를, 그리고 총 대기량의 경사기동밀도에는 Chamberlain(1978)의 자료를 사용하였다. 이 오존 흡수 단면적과 지구 대기권 밖의 태양 조도, 그리고 Rayleigh 산란 단면적의 모습이 그림 8에 있다. 여기서 Rayleigh 산란 단면적의 자료는 10^4 배로 확대되어 있는 모습이다. 그림에서 오존은 약 255 nm에서 가장 큰 흡수 단면적을 가지는 것을 볼 수 있다.

4. 관측 및 결과

4.1 관측

과학 관측 로켓 1, 2호(KSR420S-1,2)는 충청남도 서해안 안흥에서 1993년 6월 4일 오전 9시 58분과 9월 1일 오전 10시 32분에 각각 발사되었다. 이 로켓의 최대 도달 높이와 비행 시간 등은 표 3에 있다. 1, 2호기에 탑재된 전송 장치의 전송 속도는 각각 160 kbit/sec와 144 kbit/sec이었고, 자료수집 간격(data sampling rate)은 약 3 ms와 5 ms이었다(류장수의 1993).

4.2 결과

관측은 두 번의 결과 모두 성공적으로 이루어졌다. 그러나 과학 2호의 경우 태양 센서에서 나타난 로켓의 자세가 과학 1호에 비하여 비교적 불안정하였다. 과학 2호의 오존 측정기에 사용된 3채널 중에서 255와 310 nm 채널은 1회전당 2번의 침두값을 보였는데, 이것은 회전하는 로켓 안테나의 그림자에 의한 것으로 추정되었다. 따라서 이 두 채널의 자료는 제외시키고 계산하였다.

그림 9는 1호기 290 nm 채널의 원시 자료(raw data)의 모습이다. 그림에서 계단 모양의 실선은 이득전압으로서, 이득전압이 0.5 V이면 아날로그 출력 전압이 256 배, 1 V이면 64배 되어있음을 의미한다. 로켓이 롤회전을 하므로, 그림에서 펄스(pulse)모양으로 보이는 것이 복사계측

표 3. 과학 1, 2호의 발사 비교.

	1 호기	2 호기
방 위 각	191.5°	188.2°
발 사 각	66.6°	69.3°
최 대 높 이	39 km	49 km
비 행 시 간	190.6 sec	213 sec
비 행 거 리	77 km	101 km

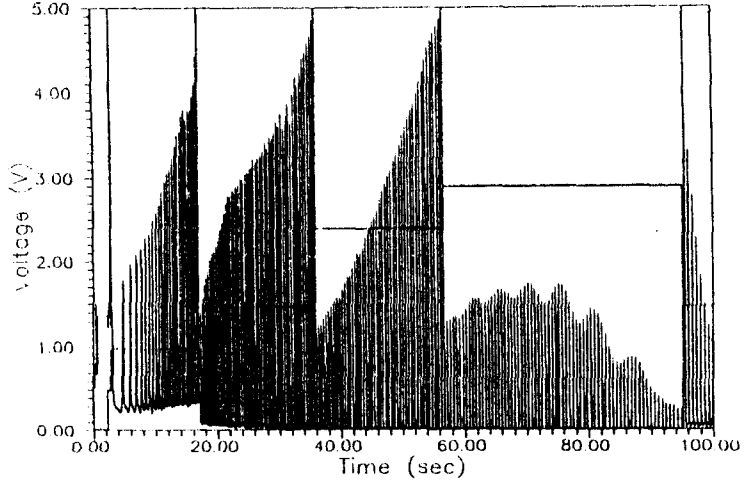


그림 9. 지상에서 수신한 과학 로켓 원시자료의 일부(과학 1호, 290 nm 채널). 계단함수 모양의 실선은 이득전압을 나타낸다. 1 V일 경우 64배, 1.5 V일 경우 16배, 2.5 V일 경우 4배, 3 V일 경우는 1배만큼 아날로그 출력값을 증폭시킨다.

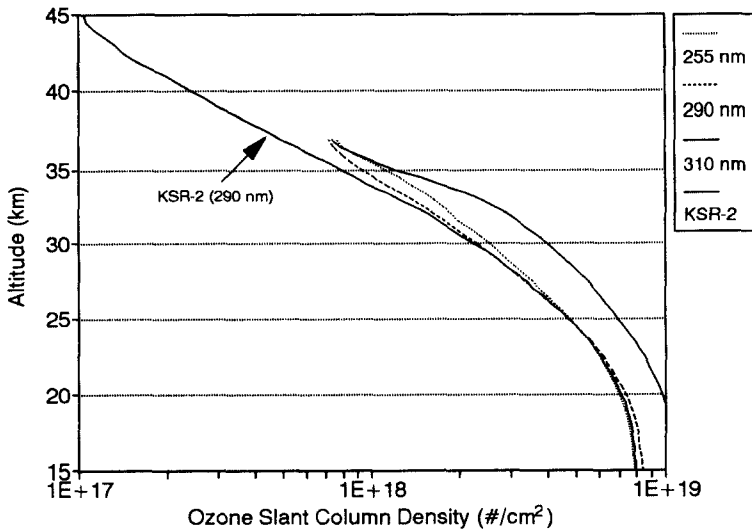
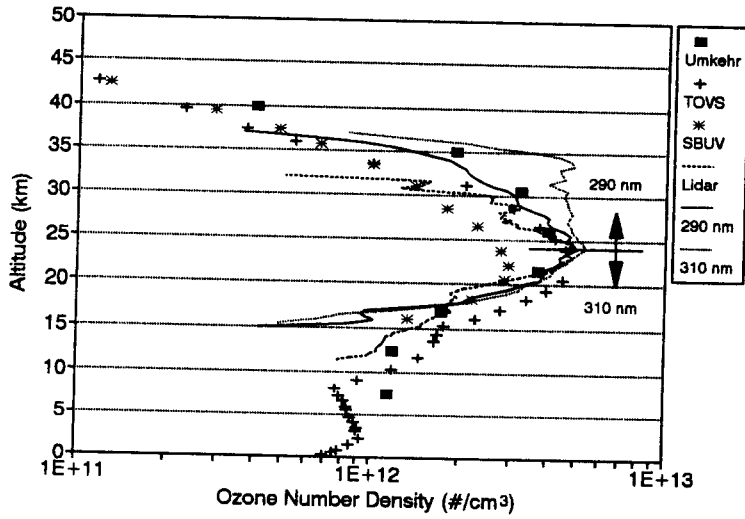
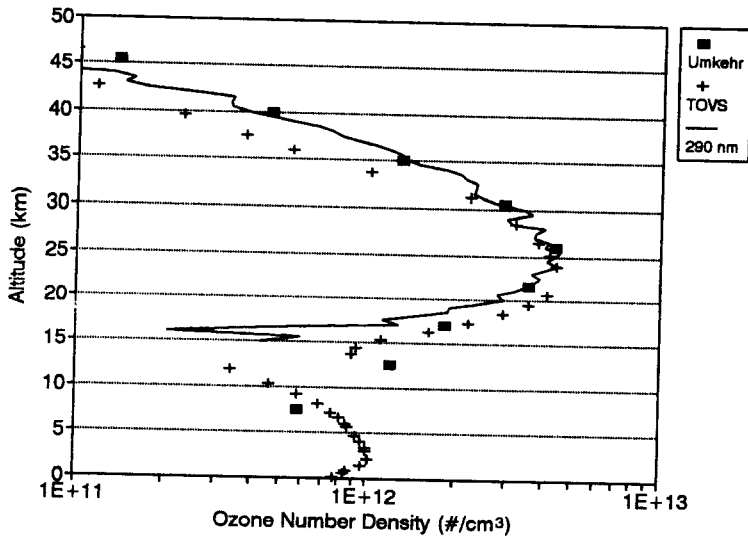


그림 10. 오존 경사 기둥밀도. 과학 1호는 15 ~ 37 km까지, 그리고 과학 2호는 15 ~ 45 km까지 나타내었다.



(a) 과학 1호



(b) 과학 2호

그림 11. 여러가지의 관측 자료 비교. (a)에서 310 nm의 자료는 최대값이 나타나는 고도 이하에서, 290 nm의 자료는 그 고도 이상에서 유효하다. SBUV를 제외한 나머지 자료들의 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

표 4. 고도에 따른 오존 수밀도의 분포 (과학 1, 2호 자료).

Altitude (km)	Ozone Number Density ($\#/cm^3$)	
	과학 1호 (290 nm)	과학 2호 (290 nm)
15.0	4.17×10^{11}	4.27×10^{11}
17.5	1.54×10^{12}	1.12×10^{12}
20.0	3.32×10^{12}	2.93×10^{12}
22.5	4.43×10^{12}	3.87×10^{12}
23.0	4.38×10^{12}	3.65×10^{12}
24.0	5.02×10^{12}	4.50×10^{12}
24.5	4.86×10^{12}	4.08×10^{12}
25.0	4.66×10^{12}	4.36×10^{12}
25.5	4.78×10^{12}	4.54×10^{12}
26.0	4.54×10^{12}	4.02×10^{12}
27.0	3.96×10^{12}	3.72×10^{12}
27.5	4.02×10^{12}	3.73×10^{12}
30.0	3.07×10^{12}	3.40×10^{12}
32.5	2.14×10^{12}	2.33×10^{12}
35.0	1.37×10^{12}	1.34×10^{12}
37.5		7.93×10^{11}
40.0		3.87×10^{11}
42.5		1.68×10^{11}
45.0		1.27×10^{11}

기가 태양을 바라볼 때의 신호이다. 이러한 4파장의 원시 자료를 7점 평균(7-point averaging)을 취하여 펄스의 첨두값을 구하고, 450 nm 채널의 값으로 다른 채널의 값을 나누어 주어서 자세 보정을 해준다. 이렇게 자세 보정된 자료로부터 새로 보정된 식, 즉 (3)식을 이용하여 계산한 오존의 경사 기동 밀도가 그림 10에 있다. 1호기의 경우 15 ~ 37 km까지, 2호기의 경우에는 15 ~ 45 km까지 나타내었다. 앞의 식 (4)에 나타내었듯이, 이 기동밀도를 유한차분(finite difference)법으로 미분해서 구한 오존의 수밀도는 그림 11에 나타나 있다. 그림 11 (a)에서 310 nm 자료와 290 nm 자료와의 차이가 약 27 km 이상의 고도에서 커지는데 그 이유는 두 가지로 추정된다: 첫째, 다른 파장에 비해서 310 nm가 오존 흡수 단면적이 가장 작은 파장이므로 310 nm 자료는 높은 고도에서 부정확하기 때문이며, 둘째, 310 nm 필터의 투과영역이 290 ~ 340 nm인 반면에, 광튜브의 응답 범위는 160 ~ 320 nm로 필터 투과영역의 일부가 광튜브 유효범위를 벗어났기 때문이다. 그리고 255 nm의 자료는 로켓의 최대 도달 고도 이상에서 유효하기 때문에, 이번 실험에

서는 이용할 수 없었다. 또한 약 20 ~ 30 km 고도범위 이상의 높이에서는 290 nm 자료를, 그리고 그 고도범위 이하에서는 310 nm 자료를 이용할 수 있다. 20 ~ 30 km의 고도 구간에서는 두 파장의 자료가 거의 같으며, 따라서 다 유효하다. 이번 관측의 결과를 보면 최대값이 나타나는 고도 이하에서는 290 nm 채널과 310 nm 채널의 결과가 별로 차이가 없음을 볼 수 있다. 따라서 과학 1, 2호 로켓 자료의 경우, 290 nm 만으로도 오존량을 구할 수 있다. 그 자료의 일부를 2.5 km 간격으로, 특히 오존량 최대값의 고도 근처에는 0.5 km 간격으로, 표 4에 나타내었다. 이렇게 측정된 1, 2호기의 오존 수밀도는 290 nm 채널의 경우, 각각 24 km 와 25.5 km 에서 5.02×10^{12} , $4.54 \times 10^{12} \# / \text{cm}^3$ 의 최대값을 나타내었다. 이 최대값 이상의 고도에서는 고도가 증가함에 따라 오존 수밀도 값이 전반적으로 감소하며, 그 이하의 고도에서는 고도가 증가함에 따라 오존 수밀도 값이 전반적으로 증가한다.

이번 관측에서는 직접적인 로켓 관측자료를 다른 간접적인 방법의 자료와 비교하기 위해서 여러 가지 관측을 동시에 수행하였다. 경희대 레이저공학연구소의 LIDAR 관측자료, 연세대의 Umkehr 관측자료, 연세대에서 제공받은 Nimbus-7 위성의 SBUV 관측자료, 기상청에서 제공받은 NOAA위성의 TOVS 관측자료, 그리고 290, 310 nm 의 과학 1호 로켓 관측자료를 비교한 결과가 그림 11 (a)에 있다. 위성자료는 후방 산란된 자외선을 이용하여 측정하는 방법이므로 낮은 고도(약 10 km 이하)에서는 높은 대기밀도로 인한 다중산란이 일어나고, 높은 고도(약 60 km 이상)에서는 낮은 대기밀도로 인해 후방산란되는 양이 작기 때문에 오차가 커진다. 그리고 LIDAR 자료는 고도가 높아질수록 레이저의 출력이 작아지므로 높은 고도(약 30 km 이상)에서 오차가 커진다.

그러므로, 그림에서 위성자료는 오존량 최대값 고도 이하의 낮은 고도에서 부정확하고, LIDAR 자료는 약 30 km 이상의 높은 고도에서 부정확해지는 것을 볼 수 있다. 그림 11 (a)를 보면 SBUV 관측자료를 제외하고는 전반적인 고도 분포가, 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. SBUV는 오래된 관측기기이기 때문에 자료가 좋지 않은 것으로 추정된다. 그러나 TOVS, LIDAR, 그리고 290 nm 채널의 자료는 약 10 % 이내로 비교적 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다. 이 그림에서 TOVS, LIDAR, 그리고 290 nm 자료의 평균값을 취해보면, 최대값이 일어나는 고도는 약 24 km 이고, 최대 오존 수밀도는 약 $4.8 \times 10^{12} \# / \text{cm}^3$ 이다. 여기에서 좋지 않은 모습을 보이는 SBUV 자료와 약 5 km의 고도 분해능을 가지는 Umkehr 자료는 최대 오존 수밀도 평균 및 비교에서는 제외하였다.

그림 11 (b)에서는 2호기 발사 때의 자료를 나타내었다. 그러나 2호기 발사때에, LIDAR 기기의 고장으로 인하여 LIDAR 관측자료를 얻을 수 없었고, SBUV 관측자료는 현재 처리중이므로 같이 비교할 수 없었다. 그러므로 Umkehr 관측자료와 기상청의 TOVS 관측자료만을 2호기의 290 nm 자료와 함께 나타내었다. 2호기 로켓의 자세가 불안정하였기 때문에, 1호기의 자료에 비해 2호기의 자료는 매끄럽지 못한 모습을 보인다. 그림에서 290 nm 로켓자료와 TOVS 위성자료의 최대 오존 수밀도는 약 3 % 이내로 매우 잘 일치하며, 최대값이 일어나는 고도 또한 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 290 nm 로켓자료와 Umkehr 자료의 경우도 오존 수밀도 최대값은 잘

일치한다. 최대 오존량이 일어나는 고도는 앞에서 설명되었듯이 Umkehr 자료와 정확히 비교할 수는 없다. 1호기와 마찬가지로 TOVS 자료와 로켓 자료의 평균을 취해보면, 최대값이 일어나는 고도는 약 24.7 km 정도이고, 최대 오존 수밀도는 약 $4.5 \times 10^{12} \# / \text{cm}^3$ 이다. 1호기와 2호기 발사 때의 자료를 비교해 보면 전반적으로 오존량이 약간 감소하였음을 볼 수 있다. 이 원인은 주로 계절적인 영향으로 추측되나, 프레온의 영향이 전혀 없다고는 할 수 없다. 그러므로, 앞으로 지속적인 관측이 수행되어야 할 것이다.

5. 결 론

로켓 관측은 고도 약 15 km 이상의 오존층을 측정하는데 매우 유용한 방법이며, 30 km 이상의 고도에서는 오존량 직접측정의 유일한 방법이다. 이 연구에서는 로켓으로 관측된 자료를 이용하여 실제 오존량의 고도별 분포를 구하였고, 다른 방법의 관측자료들과 비교, 분석하였다.

한반도 상공의 오존층을 로켓을 이용하여 처음으로 직접 관측해 본 결과, 오존 수밀도의 최대값이 일어나는 높이는 1호기의 경우 24 km, 2호기의 경우 25.5 km이었고, 그 값은 각각 5.02×10^{12} , $4.54 \times 10^{12} \# / \text{cm}^3$ 이었다. 그리고 LIDAR, 돛슨 분광 광도계, 그리고 위성의 관측자료들과 비교해 본 결과, 유사한 분포곡선을 보였으며, 그 중에서 특히 TOVS와 LIDAR 관측자료는 로켓의 290 nm 채널의 자료와 약 10% 이내로 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 북반구 중위도 지역에서 오존량의 평균적인 분포와 잘 일치하는 값이다.

그러나 몇 가지 개선되어야 할 점으로서, 첫째, 로켓이 70 km 이상의 높이까지 올라가지 못했다는 점이다. 오존층을 완전히 지난 높이에서의 측정값을 얻지 못한 것은 계산식을 보완해서 해결하였지만, 3 채널을 충분히 활용할 수는 없었다. 둘째, 로켓의 자세 안정 문제이다. 로켓의 요동이 심하면 자세 변화에 의한 효과를 완전히 제거할 수 없으며, 또한 앞으로 태양 추적기(sun-tracker)를 설치하여 발사할 때에도 자세 안정은 문제가 될 수 있을 것이다. 그리고 셋째로, 오존 측정기를 정점에서 로켓과 분리하여 낙하산을 펴서 하강할 때 관측하는 방식을 채택하면 측정시간이 길고, 측정중 진동, 충격의 영향은 적어, 보다 정확한 자료를 줄 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 류 장수 1993, 과학로켓 설계 및 개발연구(III), 최종연구보고서, 과학기술처
 박 창준 1993, 과학로켓 탑재물 및 활용연구(III), 최종연구보고서, 과학기술처
 이 기영 1994, 석사 학위 논문, 경희대학교
 조 회구, 김 정우, 이 승만 1988, 돛슨분광기 측정에 의한 대기 오존의 전량과 연직분포, 한국과학재단
 Brasseur, G. & Solomon, S. 1986, *Aeronomy of the middle atmosphere* (Dordrecht: Reidel), p. 441

- Chamberlain, J. W. 1978, *Theory of planetary atmospheres* (Academic press: New York), p. 330
- Farman, J. C., Gardiner, B. G. & Shanklin, J. D. 1985, *Nature*, 315, 207
- Kim, J., Ryoo, J. S., Park, C. J., Lim, H. B. & Lee, K. Y. 1992, *JA&SS*, 9, 193
- Mentall, J. E., Frederick, J. E. & Herman, J. R. 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 9881
- Meyer-Arendt, J. R. 1984, *Introduction to classical and modern optics* (Prentice-Hall), p. 559
- Molina, L. T. & Molina, M. J. 1986, *J. Geophys. Res.*, 91, 14501
- Park C., Lee, C. & Khmelevtsov S. S. 1994, *CLEO '94 International Conference* (in preparation)
- Penndorf, P. 1957, *J. Opt. Soc. Amer.*, 47, 176
- Shimazaki, T. 1987, in *The Solar Wind and The Earth*, ed. S. I. Akasofu and Y. Kamide (Reidel: Tokyo), p. 267
- Thekaekara, M. P. 1974, *Appl. Opt.*, 13, 518
- Watanabe, T. 1986, *Measurement of vertical profile of atmospheric ozone by rocket-borne solar radiometers*, Ph.D. Thesis, Tsukuba University