

지구 대기 중 H₂O, O₂ 등가폭의 일중 변화

강 동 일*

김해고등학교, 621-912, 경상남도 김해시 삼정동 267-34

Diurnal Variation of Equivalent Width of H₂O and O₂ in Earth's Atmosphere

Dong-il Kang*

Gimhae High School, Gyeongnam 621-912, Korea

Abstract: The scattered light of solar radiance near the infrared ray area was observed to measure H₂O and O₂ absorption lines. The changes of H₂O and O₂ equivalent width were calculated on the basis of the measurement. O₂ equivalent width showed negative correlation with the amount of solar radiance; O₂ equivalent width had a tendency to diminish as the amount of the solar radiance increased and to increase as the amount of the solar radiance decreased. On the other hand, H₂O equivalent width showed the positive correlation with the amount of solar radiance. Especially it was noted that the sum of equivalent width of absorption lines created by H₂O and O₂ in a day was fairly constant. It is implied that the constant equivalent width is caused by the complementary development of photodissociation and recombination in O₂ and H₂O.

Keywords: H₂O, O₂, absorption line, equivalent width

요약: 태양 복사의 지구 대기 산란광을 근 적외선 영역에서 분광 관측하여 H₂O와 O₂ 흡수선을 측정하고 이것으로 태양 복사량에 따른 두 기체의 등가폭 변화를 계산하였다. O₂는 태양 복사량이 증가할수록 등가폭이 줄어들고 복사량이 감소할수록 커지는 경향을 보였고, H₂O는 그 반대의 경향을 보였다. 특히 두 기체가 만드는 흡수선 등가폭의 합은 하루 중에 대체로 일정한 경향을 보였다. 본 연구에서는 이것이 태양광에 의한 광해리와 재결합이 O₂와 H₂O에 있어서 상호 보완적으로 일어나기 때문으로 추측한다.

주요어: H₂O, O₂, 흡수선, 등가폭

서론

분광분석법(spectroscopic analysis)은 물질의 종류와 양을 판정하기 위해서 물질이 빛과 상호작용할 때 발생하는 방출 스펙트럼(emission spectrum) 혹은 흡수 스펙트럼(absorption spectrum)을 이용하는 방법이다. 이 방법은 지구 대기를 화학적으로 연구할 때에도 이용될 수 있다. 즉, 태양을 광원으로 삼고 태양광이 지구 대기에 의해 흡수되고 산란된 빛을 분석하면 대기를 구성하는 기체들의 종류와 함량을 추정할 수 있는 것이다. 기상학적인 목적으로 사용되는

분광 광도계(spectro-photometer) 혹은 분광 복사계(spectro-radiometer)가 바로 분광분석법을 이용하여 대기의 화학적인 조성과 함량 분석을 돕는 기기이다.

기상학적 분광기기 분석은 대체로 스펙트럼의 특정 파장 복사 세기를 측정하여 모델과 비교하거나(박선욱 외, 2001), 가시광선 바깥 영역의 자외선과 적외선을 차폐하는 지구 대기 기체나 에어러솔의 효과와 변화 정도를 모니터링 하는 데에 주로 사용된다. 대표적으로는 자외선이 오존층 파괴에 대한 정보를 많이 주므로 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있고(이윤곤 외, 2007; 김호진 외, 1999), 적외선 영역에서는 기상현상에 큰 영향을 미치는 수증기량 측정과 관련하여 연구가 많이 진행되고 있다(김수진 외, 2007; 하정엽 외, 2006; 정의석과 손병주, 2001). 오존과 상호작용하는 자외선 영역은 지구 복사에서는 방출되지

*Corresponding author: kang_dong_il@naver.com

Tel: 82-55-331-3403

Fax: 82-55-321-1491

않고 태양 복사선에서만 관측 가능하기 때문에 지상에서 하늘을 향한 복사계로 측정을 하고, 수증기의 흡수선이 많이 분포하는 적외선은 지상보다는 위성에서 지구를 내려다보며 관측을 한다. 특히 기상 위성을 이용한 최근의 관측은 다채널 2차원 영상으로부터 정보를 얻어 내므로 매우 넓은 지역의 기상 정보를 효과적으로 관측할 수 있어서 현대 기상학의 많은 정보는 이로부터 얻고 있다(심미정 외, 2008; 김옥희와 서애숙, 2008).

본 연구에서는 지상에서 잘 관측하지 않는 600 nm에서 900 nm 사이의 근 적외선 파장대를 분광 복사계로 지상 관측하였다. 이 파장대에는 지구 대기중 O₂와 H₂O의 강한 흡수선대가 밀집해 있는데 이 흡수선의 세기가 태양의 고도에 따라 달라진다는 것을 관측적으로 경험한 바 있어서 이것이 실제로 어느 정도로 변화하는지 정량적으로 측정하고 어떤 물리량과 관련이 있는지 확인하고자 하였다. 더군다나 이 두 기체는 대기를 구성하는 주요한 성분이면서 기상 현상에 밀접한 관련이 있지만 흡수선의 세기 변화와 관련한 선행연구가 수행된 바가 없었다.

관측 및 자료처리

관측 방법

시간에 따라 변하는 흡수선의 세기 변화를 관측하기 위해 망원경을 서쪽 10°를 지향하도록 고정 설치하여 일출로부터 일몰까지 관측하였다. 노출 시간은 0.2초로 고정하였다. 이러한 노출을 1분 동안 계속 반복해서 얻은 스펙트럼을 1분 단위로 평균하여 저장하도록 해서 S/N(신호대 잡음비)를 높이고자 하였다.

관측 기기

본 연구는 대기 산란광을 특정한 방위각과 고도에서 관측하기 때문에 구경이 작은 망원경을 수동으로 고정해 두고 관측하였다. 망원경은 구경 80 mm, 초점거리 900 mm인 굴절 망원경을 이용하였다. 태양의 대기산란광이 충분히 밝은데도 망원경을 사용한 것은 망원경의 집광력으로 노출시간을 더욱 줄여 S/N를 높일 수 있고 관측 고도와 방위각을 적절히 고정할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

Table 1. Specification of USB2000

Specification	Value
Detector range	600-800 nm
Pixels	3648 pixels
Pixel size	16 bit
Pixel well depth	1000,000 electrons
S/N	300 (at full signal)
Corrected linearity	>99.8%
Optical resolution	~0.3 nm FWHM

분광기는 Ocean Optics 사의 USB2000을 이용하였다. 이 분광기는 분광화학, 광학, 계측 등 범용의 분광기기로서 분광기 자체에 신호를 기록하는 검출기가 같이 구성되어 있어서 사용하기가 매우 편리하다. 분광기에 대한 상세한 내용은 Table 1에 정리하였다.

관측 자료

USB2000의 산출 파일은 ASCII 형태로 저장된다. 파일은 2개의 필드로 구성되는데 첫 번째 필드는 파장이 나노미터 단위로 기록되고 두 번째 필드는 세기(intensity)가 ADU (analogue to digital unit) 단위로 기록된다. 파장은 598.84 nm에서 907.76 nm까지 이고 이것이 총 3648 화소에 걸쳐 있으므로 화소 당 파장 간격은 평균 0.085 nm로 소형 분광기로서는 상당히 높은 파장 분해능이라고 할 수 있다.¹⁾

비가 오거나 기상상황이 특별히 나쁜 경우, 그리고 개인적인 사정으로 관측을 하지 못한 날을 제외하고 2009년 2월부터 2010년 6월에 걸쳐 150여 일을 관측하였는데, 그 중 관측을 잘못하여 쓸 수 없는 날짜를 제외하면 자료처리에 사용한 관측일은 모두 110일 정도였다.

자료 처리 및 분석

1) 원시 자료(raw data)

시계열(time-series) 분광 관측으로 얻은 스펙트럼 S의 일련 번호를 i 라 두고 하루 동안 얻은 스펙트럼을 S_i 로 표기하자. 다음 Fig. 1은 S_i 의 한 사례로 그린 원시 스펙트럼(raw spectrum)이다. 그래프의 개형은 태양의 플랑크 곡선(Plank's curve)의 일부로서 대략 550 nm 부근에 있는 정점(peak)의 바로 오른쪽 부분에 해당한다.

1) Ocean Optics사에서 생산하는 USB2000 일반 생산품은 파장 대역이 300 nm에서 1000 nm이고, 파장 분해능이 대략 0.3나지 0.6 nm 정도로 낮다. 이 회사는 주문자의 요구에 따라 파장의 대역을 조정해 준다. 이 연구를 위해서 600 nm에서 900 nm의 대역만을 따로 요구하였고 따라서 파장 분해능이 보다 향상되었다.

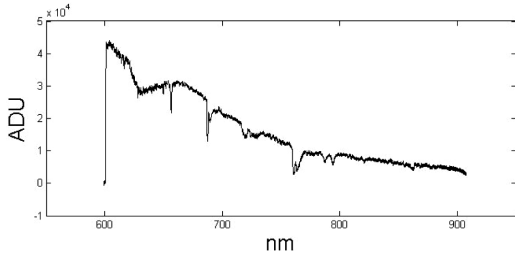


Fig. 1. Raw spectrum of USB2000. The dimension of y-axis ADU means analogue digital unit.

2) 스펙트럼 정규화

스펙트럼을 정규화 한다는 것은(spectrum normalization) 관측한 스펙트럼에서 흡수선이 없는 부분을 이용하여 연속 스펙트럼(continuum spectrum)을 복구하고 이 연속스펙트럼으로 관측 스펙트럼을 나누어서 나타내는 과정을 말한다. 정규화된 스펙트럼은 흑체의 연속 스펙트럼에 대한 상대적인 비율로 나타나게 된다. 이것은 광 경로에 있는 기체의 화학적 함량 분석을 위해서 반드시 거쳐야 하는 과정이다. S_i 을 정규화된 스펙트럼을 S_n 라 하자(Fig. 2).

3) 표준편차 스펙트럼 계산

일출로부터 일몰까지 관측하면 자료는 대략 500여 개가 된다. 이러한 시계열(time-series) 관측 스펙트럼의 특정 파장대역이 변화한 정도를 알아보기 위해서 다음과 같이 계산 하였다.

우선 하루동안 관측한 모든 스펙트럼을 더하고 자료 개수로 나누어 평균 스펙트럼을 구하고 이를 S_m 이라 하자. 이제 정규화된 스펙트럼 S_n 와 평균 스펙트럼 S_m 의 차($S_r = S_n - S_m$)로부터 잔차 스펙트럼(residual spectrum)을 구하고 이를 S_r 이라 하자.

Fig. 3는 잔차 스펙트럼을 나타낸 것이다. 스펙트럼이 하루 관측하는 동안 변화가 없다면 잔차 값은 0에 가까울 것이지만 어떤 변화가 있었다면 0으로부터 멀어지는 값을 가진다. 그림에서 볼 수 있듯이 특정 파장대에서 평균과는 매우 다른 값들을 보이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 잔차 스펙트럼 하나를 나타냈을 뿐이다. 모든 시계열 관측 자료에 대해 특정 파장대에서의 변화 정도를 살펴보기 위해 잔차 스펙트럼 S_r 로부터 표준편차 스펙트럼 S_d 를 다음과 같이 계산하였다.

$$S_d_j = \frac{\sqrt{(S_{r_{ij}} - S_{m_j})^2}}{m-1}$$

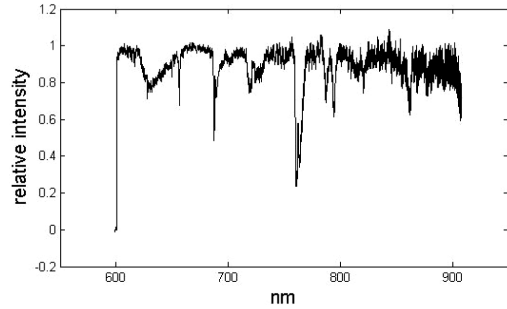


Fig. 2. Continuum normalized spectrum. Long wavelength area has very bad S/N. Note that the dimension of y-axis changed to relative intensity.

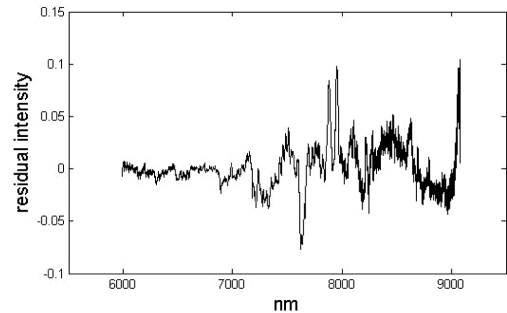


Fig. 3. Residual spectrum. The value of this spectrum represents the difference between mean spectrum and observed spectrum.

Fig. 4는 위 식으로부터 구한 표준편차 스펙트럼이다. 값이 작을수록 스펙트럼의 변화가 없는 부분이며, 값이 클수록 스펙트럼의 변화가 있었다는 것을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 표준편차가 아무런 값을 가지지 않고 특정한 파장에서는 큰 변화의 정도를 보인다. 이것은 그 파장대의 연속선 수준에서 상대적인 세기 변화가 있었음을 의미한다. 한편 잔차 스펙트럼의 긴 파장으로 갈수록 바닥값이 점점 올라가는 것을 볼 수 있는데 이것은 원래 긴 파장으로 갈수록 원시 자료의 S/N이 작았기 때문이다(Fig. 3).

이것으로 몇 몇 파장에서의 세기 변화가 통계적으로 의미 있는 변화의 패턴을 갖고 있음을 확인하였다. 태양 스펙트럼은 본질적으로 Fig. 4에서 보이는 것과 같은 큰 변화를 보이지 않기 때문에 그림의 큰 표준 편차 값들은 지구 대기로부터 기인한 것이 분명하다. 큰 표준편차를 보이는 파장에 해당하는 원소를 동정하기 위해서 Harvard 대학의 HITRAN database²⁾를 이용하였다. Fig. 5에 보듯이 760 nm과

2) <http://www.cfa.harvard.edu/hitran>

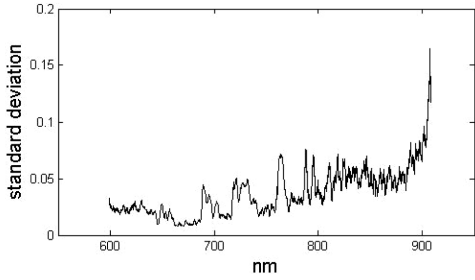


Fig. 4. Standard deviation spectrum.

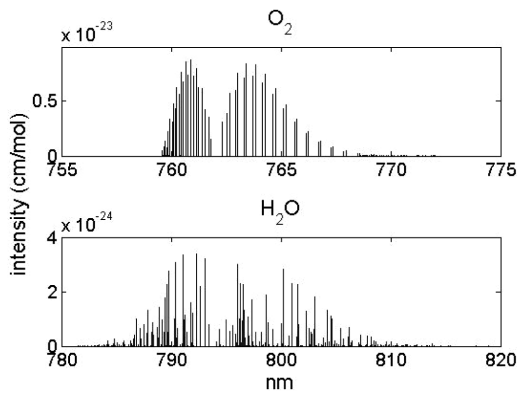


Fig. 5. O₂ and H₂O spectrum synthesized from HITRAN database.

790 nm을 중심으로 하는 흡수선들이 각각 O₂와 H₂O에 의한 것임을 확인하였다. Fig. 4에서 큰 표준 편차를 보이는 다른 부분들도 있지만 이들은 두 가지 이상의 성분이 섞여 있고 동정하기가 힘들어서 본 연구에서는 이용하지 않기로 하였다. 760 nm과 790 nm 대역 부근에서 O₂, H₂O 이외의 지구 대기 분자선이 있는지 조사해 보았으나 다른 분자선을 찾을 수 없거나 있더라도 세기가 매우 미약하여 두 흡수선 대역은 거의 순수한 O₂와 H₂O 대역으로 보아도 무방한 것으로 판단하였다.

4) 등가폭 계산

앞 절에서 760 nm 부근에서 강한 O₂ 흡수선대가, 790 nm 부근에서 강한 H₂O 흡수선대가 있음을 확인하였다. 이 흡수선을 만드는 기체들의 관측 방향으로의 대기 중 기둥 밀도(column density)를 측정하기 위해서 흡수선의 등가폭(equivalent width)을 계산하였다. 등가폭은 정규화 된 스펙트럼에서 흡수선의 면적을 의미하며 단위는 nm가 된다. 등가폭의 변화에 대한 결과는 다음 절에서 자세히 설명한다.

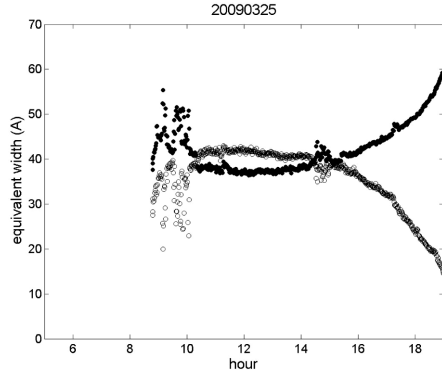


Fig. 6. Equivalent width to hour graph of 2009-3-26. Bad weather made distributed data points before noon.

O₂, H₂O 흡수선의 등가폭 변화

Fig. 6은 O₂와 H₂O의 관측 시간에 따른 등가폭의 변화를 나타낸 것이다. 두 성분이 시간에 따른 등가폭의 체계적인 변화 양상을 보이는데 O₂는 정오에 최소이며 아침과 저녁으로 갈수록 점점 증가하는 양상을 보인다. 반면에 H₂O는 오전을 정점으로 해서 아침과 저녁으로 갈수록 점점 감소하는 양상을 보인다.

대기 분자선의 등가폭을 관측시간에 따라 표현하였지만 사실 두 물리량은 직접적인 관련이 없다. 분자선의 등가폭에 변화가 있다면 Fig. 6에서 보이는 등가폭의 체계적인 변화 패턴에서 보듯이 태양의 고도에 따른 태양 복사량(solar radiation)이 직접적인 영향일 것으로 추측하였다. 이를 확인하기 위해 경상남도과학교육원에 설치한 AWS 즉, 자동기상관측시스템(automatic weathering system) 정보를 이용하기로 하였다. 이 시스템은 김용남 외(2009)가 기온, 습도, 풍향, 풍속, 태양 복사, 지면 복사 등의 정보를 10분 간격으로 측정하여 웹 서비스³⁾하도록 구축한 것으로서, 측정 기기가 본 연구의 관측 장소와 같은 곳에 설치되어 있기 때문에 물리적인 연관성을 확인하기에 적합하였다.

Fig. 7은 태양 복사량에 대한 등가폭의 그래프이다. 그림에서 보듯이 태양 복사량이 증가함에 따라 O₂는 등가폭이 감소하고, H₂O는 증가하는 체계적인 양상을 보인다. 대기 분자 흡수선의 등가폭은 관측 방향의 기둥 밀도를 의미하므로 태양의 고도가 높아져서 복사량이 커지면 관측 방향으로의 O₂ 밀도는 감소하

3) <http://earth.gnse.kr>

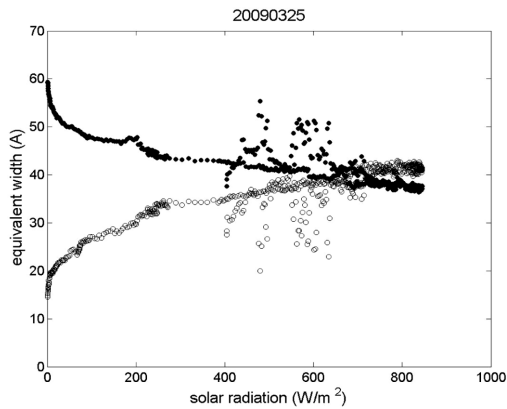


Fig. 7. Equivalent width to solar radiance graph. This graph is plotted using the data of Fig. 6.

는 반면 H₂O는 증가하고, 태양의 고도가 낮아져서 복사량이 줄어들면 그 반대로 되는 것이다.

그런데 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 O₂와 H₂O 등가폭이 증감하는 경향이 상당히 대칭적이다. 이것은 기상이 고르지 않아서 시간-등가폭의 그래프(Fig. 6)나 태양 복사량-등가폭의 그래프(Fig. 7)에서 각 분자선이 매끈한 변화를 보이지 않고 굴곡이 많이 생길 때에도 서로 아주 대칭적이었다. 그래서 태양 복사의 세기에 따라 이 두 성분의 등가폭을 더하여서 그래프를 그려 보았다. 위 Fig. 8은 O₂와 H₂O 등가폭의 합을 시간(위 그림)과 태양 복사량(아래 그림)에 따라 그린 것이다. 그림에서 보듯이 대체로 두 분자선의 등가폭 합이 일정한 것을 볼 수 있다(Fig. 8은 Fig. 7로부터 그려진 것이 아니고 2009년 4월 3일 자료이다). 관측한 모든 자료에 대해서 Fig. 8과 같은 그래프를 그려보았을 때 날씨가 맑은 날일수록 이와 같은 경향을 보였다. Table 2는 운량이 적은 12일 동안의 O₂, H₂O 등가폭의 합과 평균에 대한 제곱근 오차 (root mean square error), 그리고 백분 오차값을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보면 각 성분의 등가폭은 변화의 범위가 크고 체계적이지만 두 등가폭의 합은 Table 2에서 보듯이 수 % 오차 범위 이내에서 변화가 매우 적다. 이것은 매우 뜻밖의 결과로 전혀 기대했던 현상은 아니었다. 도대체 이것은 무엇을 의미할까? 관련 문헌을 조사해 보았지만 비슷한 선행 연구를 찾지 못했다. 우선은 이것이 태양광에 의해 O₂가 광해리 되고, 해리된 O 원자와 H가 다시 H₂O를 합성하게 되는 것으로 조심스럽게 추측하였다. 그렇다면 태양 복사의 세기에 따라 O₂와 H₂O의 등가폭이 서

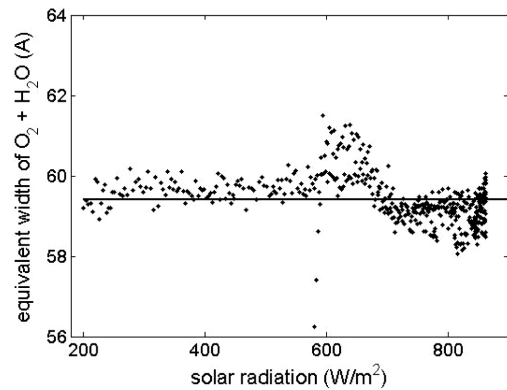


Fig. 8. Equivalent width of O₂+H₂O.

Table 2. Sum of equivalent width of O₂ and H₂O

yr-month-day	EW (nm) (O ₂ +H ₂ O)	r.m.s (nm)	error (%)
2010-03-30	5.831	0.124	2.12
2010-04-02	6.073	0.131	2.16
2010-04-03	5.940	0.061	1.02
2010-04-05	5.859	0.269	4.59
2010-04-06	6.125	0.102	1.67
2010-04-07	5.973	0.121	2.02
2010-04-08	5.975	0.159	2.67
2010-04-12	5.957	0.270	4.53
2010-04-14	6.034	0.222	3.67
2010-04-15	6.004	0.265	4.42
2010-04-16	5.927	0.105	1.77
2010-04-17	5.819	0.139	2.39

로 반대로 증감하는 상보적인(complementary) 관계도 설명할 수 있을 것이다. 한편으로는 등가폭의 합이 하루 중에 일정하면서도 날마다 조금씩 다른 현상이 기상학적 요소와 관련이 있을 것으로도 추측한다. 이 관계에 대한 이론적인 연구는 본 연구의 범위를 넘어서고 본 연구에서 수행한 관측 이외에도 다양한 기상학적 관측 자료를 요구하는 것이어서 여기서는 더 이상 다루지 않기로 한다.

결론 및 제언

본 연구에서는 파장 대역이 598.84 nm에서 907.76 nm이고 평균 분해능이 0.085 nm인 분광기와 소형 망원경으로 태양 복사의 대기 산란광을 관측하여 O₂와 H₂O 흡수선이 보이는 등가폭의 변화를 연구하였다. 관측을 통해 태양 복사량이 클수록 O₂ 흡수선의 등

가폭은 작아지고, H₂O 흡수선의 등가폭은 커지는 경향을 확인하였다. 또한 등가폭이 태양 복사량의 변화에 대해서 체계적인 관계를 가지고 있으며 특히 두 분자선의 등가폭 합이 하루 종일 대체로 일정한 것을 확인하였다. 이것은 두 분자가 태양광에 의해 광해리 되고 재결합하면서 나타나는 현상이거나 그 외 기상학적인 원인에 의한 것으로 추측한다.

감사의 글

본 연구는 경상남도과학교육원의 '2010 첨단과학고사연구제' 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 경상남도과학교육원의 어윤수 원장님, 하을태 교육연수부장님, 홍정희 교육연구사님과 경상남도교육청의 성기홍 과학직업교육과장님께 감사 말씀을 드립니다. 더불어 이 논문의 완성을 위해 조언해 주신 익명의 심사위원님들께 지면을 빌어 감사의 말씀을 전해 드립니다.

참고문헌

김수진, 하정엽, 박중현, 이광목, 2006, 정지기상위성의 수

- 증기 채널을 이용하여 산출한 여름철 동아시아 지역 상층 수증기량의 검증. 2007년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 100-101.
- 김옥희, 서애숙, 2008, 2008년 1월 21일-22일 한반도 대설시 위성영상분석. 2008년도 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 394-395.
- 김용남, 성기홍, 홍정희, 강동일, 2009, 자동기상관측시스템을 활용한 실시간 기상 관측 자료 제공웹 페이지 개발. 한국지구과학회, 30, 478-484.
- 김호진, 조희구, 김준, 1999, 파장별 지표 UV-B 복사에 대한 오존과 에어로졸의 효과. 한국기상학회 1999년도 정기총회 초청강연 및 가을 학술발표회, 50-53.
- 박선욱, 김준, 조희구, 2001, 파장별 자외선 복사에 대한 관측값과 계산값의 비교. 대기, 11, 427-430.
- 심미정, 홍성훈, 심재면, 김도형, 서애숙, 2008, 위성영상을 이용한 2007년 겨울철 황사사례분석. 2008년 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 388-389.
- 이윤곤, 김호진, 김준, 조희구, 2007, 파장별 지표 자외선 복사에 오존과 에어로졸 변화의 의존도. 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 132-133.
- 정의석, 손병주, 2001, SSM/T-2 자료를 이용한 대류권 상층 수증기량 추정. 대기, 11, 211-214.
- 하정엽, 이광목, 박중현, 박상민, 2006, MTSAT-IR 자료를 이용한 상층 수증기량 산출. 2006년도 한국기상학회 봄철 학술대회 논문집, 198-199.

2010년 7월 8일 접수
2010년 7월 25일 수정원고 접수
2010년 7월 31일 채택