

복사전달모델과 초분광센서를 이용한 아황산가스와 이산화질소의 농도 측정 가능성 분석

신정일¹, 김익재¹, 최민재², 임성하^{2*}

¹(주)지오스토리 기술연구소, ²한국국토정보공사 융복합사업부

Analysis of Potential on Measurement of SO₂ and NO₂ using Radiative Transfer Model and Hyperspectral Sensor

Jung-il Shin¹, Ik-Jae Kim¹, Min-Jae Choi², Seong-Ha Lim^{2*}

¹Research Center, Geostory Inc.

²Division of Convergence, Korea Land and Geospatial InformatiX Corporation

요 약 현재 대기질 관측 방법은 지상관측망과 인공위성 자료를 기반으로 실시되고 있다. 그러나 현재 방법은 국소지역 및 특정 사업장에 대한 불법 대기오염 물질 배출 증거를 채집하는데 한계가 있으므로 첨단센서를 이용한 증거 채집 방법 개발이 필요한 실정이다. 이 연구에서는 이산화질소와 아황산가스 농도 측정에 있어 자외선 초분광센서의 활용 가능성을 분석하였다. 사용한 스펙트럼은 두 가지 종류로 복사전달모델을 이용하여 모의한 농도별 스펙트럼과 초분광센서를 이용하여 측정된 각 가스의 한 개 농도에 대한 스펙트럼이다. 초분광센서의 활용 가능성을 파악하기 위하여 모의한 스펙트럼과 초분광센서를 이용한 관측 스펙트럼의 차이를 분석하고, 모의 스펙트럼을 이용하여 가스의 농도에 따른 스펙트럼의 변화를 분석하였다. 그 결과 초분광센서로 관측한 스펙트럼과 복사전달모델로 모의한 스펙트럼이 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한 모의한 스펙트럼에서 특정 파장의 흡수 깊이가 가스의 농도와 매우 높은 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다. 따라서 초분광센서를 이용하여 대기오염물질인 이산화질소와 아황산가스의 농도 추정 가능성이 높은 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 초분광센서를 이용하여 다양한 농도에 대한 이산화질소와 아황산가스에 대한 스펙트럼을 관측하고, 농도 추정 가능성을 검증할 필요가 있다.

Abstract Current measuring methods for air quality are based on ground measurement networks and satellite data. New methods of collecting evidence with advanced sensors are needed because current methods have limitations in collecting evidence for the illegal emission of air pollutants at narrow areas or specific sites. This study analyzed the possibility of using an ultraviolet hyperspectral sensor to measure the concentration of nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Two types of spectra were used: simulated spectra for gases with various concentrations using a radiative transfer model and observed spectra for each gas for a concentration. To understand the possibility of using a hyperspectral sensor, the differences between the simulated spectra and the observed spectra were analyzed, and the variation of simulated spectra were then analyzed according to the concentration. The results showed good agreement between observed spectra and simulated spectra. In addition, the absorption depth at specific wavelengths in the simulated spectra had a very strong correlation with the gas concentration. The gas concentration could be estimated using the hyperspectral sensor. In the future, validation would be needed to estimate the gas concentration through observations of various concentrations of gases using a hyperspectral sensor.

Keywords : Air pollutant, Concentration, Estimation, Hyperspectral sensor, Radiative transfer model

본 논문은 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업(과제번호: 2016000200011)에서 지원받아 한국국토정보공사와 주식회사 지오스토리에서 수행하였음.

*Corresponding Author : Seong-Ha Lim (Korea Land and Geospatial InformatiX Corporation)

Tel: +82-63-906-5349 email: limsh07@lx.or.kr

Received April 9, 2018

Revised (1st May 14, 2018, 2nd May 31, 2018)

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

1. 서론

최근 공업화가 가속되고 대규모 공단이 늘어나면서 대기오염이 사회적 문제로 제기되고 있다. 환경부는 대기환경오염물질 배출에 대한 법률을 정해 관리, 통제, 단속 및 모니터링을 실시하고 있다. 현재 대기질을 관측하는 수단으로 인공위성과 지상관측망(AirKorea), 굴뚝원격감시시스템(CleanSYS) 등을 이용하고 있다. 인공위성 자료는 광역적인 모니터링이 가능하지만 공간해상도와 관측주기의 한계로 인해 국소지역에 대한 실시간 관측이 불가능 하다[1-2]. 지상관측망은 전국 주요 지점에 대한 실시간 자료를 제공하고 있으나 관측망의 밀도가 낮아 국소지역이나 특정 사업장에 대한 모니터링이 불가능한 단점이 있다[3]. 사업장에 대한 대기오염물질 배출 모니터링을 위해 설치된 굴뚝원격감시시스템은 대규모 시설을 대상으로 설치하므로 그 대상이 제한적인 단점이 있다[4]. 따라서 현재 이용되고 있는 대기질 관측 방법은 사업장을 대상으로 한 불법 오염물질 배출 단속과 증거채집에 한계가 있다[5]. 따라서 배출지점에서 증거를 채집할 수 있는 기술 개발이 필요하며, 드론과 침단센서의 융합을 통한 증거채집이 가능할 것이다.

최근 대기 환경 모니터링을 위하여 다양한 침단 센서를 기반으로 한 측정 기술과 이를 활용하기 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다[6-7]. 초분광센서는 매우 좁은 파장영역에서 가스에 의해 흡수 및 산란된 복사광량(radiance)을 스펙트럼의 형태로 측정할 수 있다. 특히 자외선 초분광센서는 주요 대기오염물질인 이산화질소(Nitrogen Dioxide, NO_2)와 아황산가스(Sulfur Dioxide, SO_2)에 민감한 파장영역의 복사광량을 측정할 수 있다[8-9]. 자외선 초분광센서를 이용하여 대기오염물질의 농도를 추정하기 위해서는 다양한 농도에 대한 이론적인 스펙트럼의 특징이 센서로 관측한 스펙트럼에서도 나타나는지 평가할 필요가 있다.

이 연구는 국소지역의 대기오염물질 농도 측정에 있어 자외선 초분광센서의 활용 가능성을 분석하기 위한 초기 연구이다. 이를 위하여 첫째, 기준 혼합가스를 초분광센서로 관측한 스펙트럼과 복사전달모델을 이용하여 모의한 스펙트럼을 비교함으로써 초분광센서의 활용 가능성을 평가하고자 한다. 둘째, 다양한 농도의 아황산가스와 이산화질소에 대한 모의 스펙트럼을 이용하여 농도 추정 가능성을 분석하고자 한다.

2. 연구자료

2.1 모의 스펙트럼

아황산가스와 이산화질소의 농도에 따른 이론적인 스펙트럼을 모의하기 위하여 대기 복사전달모델 중 하나인 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission)을 이용하였다. 본 연구에서는 각 가스의 농도와 기하조건인 태양천정각(Solar Zenith Angle, SZA), 관측천정각(Viewing Zenith Angle, VZA), 태양-센서 상대방위각(Relative Azimuth Angle, RAA)을 Table 1과 같이 정의하였다. 가스의 농도는 대기환경보전법에서 규정하고 있는 사업장 규모별 배출허용 농도이다.

복사전달모델에서 산출되는 모의 스펙트럼은 분광해상도(밴드폭)가 약 0.1nm로 매우 높고, 매우 심한 잡음이 포함되어 있다. 잡음을 제거하기 위하여 주변 파장(밴드)의 값을 이동평균(moving average)하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이 연구에서는 주변 15개 밴드에 대한 이동평균을 실시하였다. 그 결과 Fig. 1과 같이 주요 흡수특성은 유지하면서 잡음이 제거된 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

Table 1. Variables of gas concentration and geometric condition for simulation spectral radiance using MODTRAN

Gas	NO_2	SO_2
Concentration (PPM)	25, 50, 100, 200, 500, 800	5, 10, 50, 100, 200, 300, 500
Solar Zenith Angle (degree)	60	
Viewing Zenith Angle (degree)	0	
Relative Azimuth Angle (degree)	0	

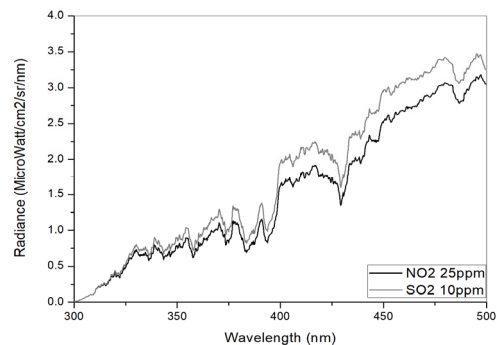


Fig. 1. Smoothed spectra using moving average for simulated spectra

2.2 관측 스펙트럼

이산화질소와 아황산가스의 스펙트럼을 관측하기 위하여 사용한 초분광센서는 Table 2 및 Fig. 2와 같이 미국 OceanOptics 사의 FX spectrometer이다. 이 센서는 자외선(200nm)에서부터 근적외선(1050nm)까지 0.4nm 간격으로 복사량을 측정할 수 있다. 또한 크기가 매우 작고 무게가 가벼워 무인항공기에 장착하기에 용이하다.

Table 2. Specification of hyperspectral sensor

Sensor	FX, OceanOptics, USA
Wavelength range	200 - 1040nm
Band (channel)	2450
Band Width	0.4nm
Field of View	25°
Signal to Noise Ratio	290:1
Size	89mm x 64mm x52mm
Weight	0.4kg

관측의 대상인 혼합가스는 NO₂ 25ppm과 SO₂ 10ppm의 농도로 제작되었다. 관측 방법은 Fig. 2와 같이 석영으로 제작한 100×100×100mm 크기의 셀에 가스를 약 1기압으로 흐르게 한 후 Fig. 3의 초분광센서를 이용하여 태양의 복사광량, 비어있는 석영 셀의 복사광량, 가스가 흐르는 셀의 복사광량을 각각 측정하였다. 이 때 태양의 복사광량은 99% 반사도의 백색기준판을 측정하는 것으로 대체하였다.



Fig. 3. Observation setting to measure spectra of NO₂ and SO₂ gases using a hyperspectral sensor

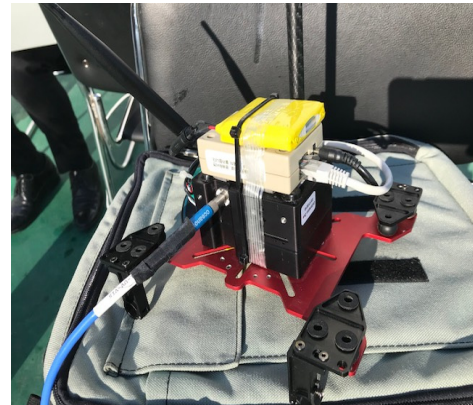


Fig. 4. FX hyperspectral sensor (OceanOptics, USA)

관측장소는 그림자가 없는 옥상에서 실시하였고, 기하조건은 복사전달모델을 이용한 모의 시 기하조건과 동일하게 태양천정각 60도, 관측천정각 0도, 상대방위각 0도에서 관측하였다. Fig. 4는 초분광센서를 이용하여 관측한 표준가스의 스펙트럼을 보여주고 있다.

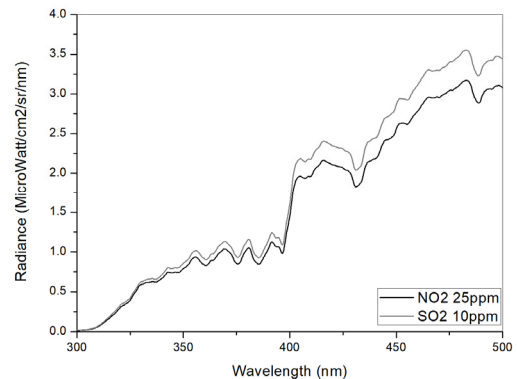


Fig. 5. Observed spectra with hyperspectral sensor

3. 모의 스펙트럼과 관측 스펙트럼 비교

모의 스펙트럼을 기준으로 관측 스펙트럼을 비교함으로써 관측 스펙트럼을 이용한 가스 농도 추정 가능성을 판단할 수 있다. 여기에서 스펙트럼을 비교하기 위한 파장영역은 가스 농도 추정에 주로 사용되는 300-500nm 영역을 대상으로 하였다.

모의 스펙트럼과 관측 스펙트럼을 비교한 통계치는 Table 3과 같이 이산화질소에서 최대 0.59, 최소 0.0001, 평균 0.08, 표준편차 0.13으로 나타났다. 아황산가스 또

한 유사한 수치로 최대 0.58, 최소 0.0001, 평균 0.08, 표준편차 0.14로 나타났다. 또한 Fig. 6과 같이 관측 스펙트럼과 모의 스펙트럼의 패턴과 값이 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 모의 스펙트럼을 이용하여 이산화질소와 아황산가스의 농도 추정을 위한 초분광 센서의 활용 가능성을 간접적으로 판단해 볼 수 있다.

Table 3. Difference between simulated and measured spectra

Gas	Maximum	Minimum	Mean	Standard deviation
NO ₂	0.59	0.0001	0.08	0.13
SO ₂	0.58	0.0001	0.03	0.14

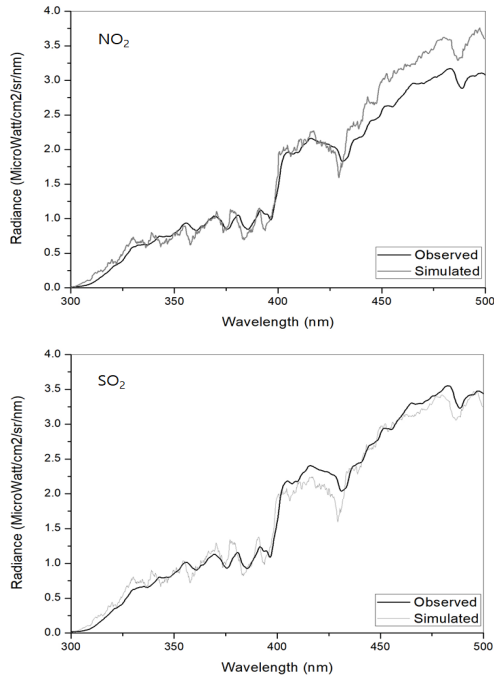


Fig. 6. Comparison between simulated and measured spectra for NO₂ and SO₂ gases

4. 모의 스펙트럼을 이용한 가스 농도 추정 가능성 분석

모의 스펙트럼과 관측 스펙트럼을 비교한 결과 유사도가 높고 특정 파장에서 나타나는 흡수 특성이 유사하게 나타났다. 따라서 다양한 농도의 가스에 대한 스펙트

럼을 모의한 후 특정 파장에서의 흡수 깊이와 가스 농도 간의 회귀분석을 실시하였다. 여기에서 특정 파장영역은 Fig. 7과 같이 각 가스의 흡수파장으로 알려진 영역 중에서 흡수특성을 용이하게 측정할 수 있는 파장영역을 선택하였다. 흡수 깊이는 해당 파장영역에서 최고와 최저의 차를 이용하여 산출하였고, 최고와 최저는 가장 가까운 파장을 대상으로 하였다.

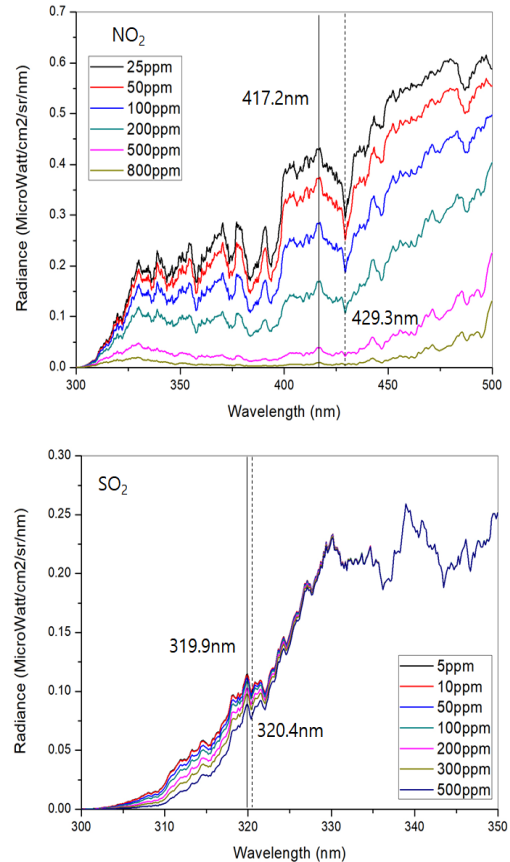


Fig. 7. Simulated spectra for various gas contamination and wavelength to measure absorption depth

그 결과 Fig. 8과 같이 두 종류의 가스 모두 지수 형태의 회귀식을 산출할 수 있었고, 산출한 회귀식의 적합도를 나타내는 R²값은 0.999와 1로 매우 높은 수치를 보여 주었다. 따라서 특정 파장영역에서 흡수 깊이를 이용하여 이산화질소와 아황산가스의 농도 추정이 가능한 것으로 판단된다. 또한 앞서 언급한 모의 스펙트럼과 관측 스펙트럼의 유사성이 높다는 점을 바탕으로 두 가스의 농도 추정을 위해 초분광센서 활용이 가능한 것으로 판단

된다.

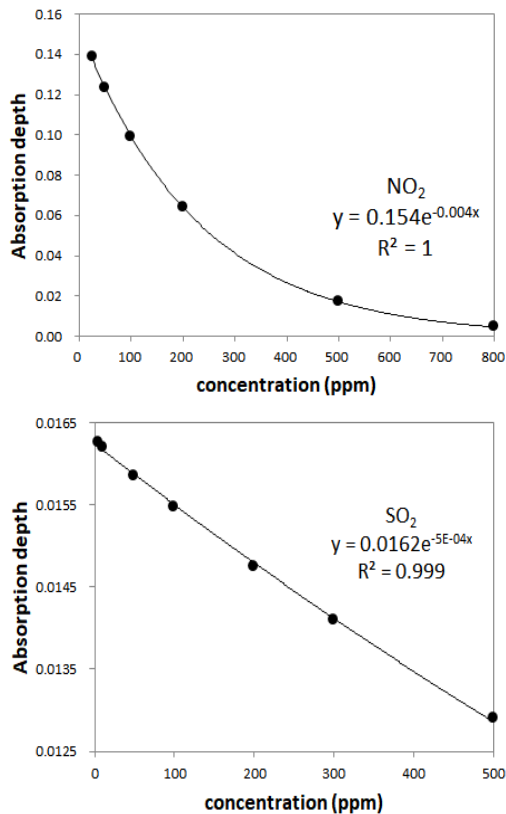


Fig. 8. Regression between gas contamination and absorption depth

5. 결론

이 연구는 대기오염물질인 이산화질소와 아황산가스의 농도를 측정하는데 있어 초분광센서의 활용 가능성을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 첫째, 초분광센서를 이용한 관측 스펙트럼과 복사전달모델을 이용한 모의 스펙트럼의 유사도를 분석하였다. 그 결과 관측 스펙트럼과 모의 스펙트럼이 매우 유사한 것으로 나타났다. 둘째, 복사전달모델을 이용하여 다양한 농도에 대한 모의 스펙트럼으로부터 특정 파장의 흡수 깊이가 가스의 농도와 매우 높은 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다. 따라서 초분광센서를 이용하여 대기오염물질인 이산화질소와 아황산가스의 농도 추정 가능성이 높은 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서는 한 가지 농도의 이산화질소와 아

황산가스 각각을 대상으로 모의 스펙트럼과 관측 스펙트럼을 비교하였다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 농도에 대한 이산화질소와 아황산가스를 대상으로 스펙트럼을 관측하고, 모의 스펙트럼과의 비교 및 농도 추정 가능성을 검증할 필요가 있다.

References

- [1] R. V. Martin, "Satellite Remote Sensing of Surface Air Quality", *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 34, pp. 7823-7843, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- [2] C. Wespes, L. Emmons, D. P. Edwards, J. Hannigan, D. Hurtmans, M. Saunio, P. F. Coheur, C. Clerbaux, M. T. Coffey, R. L. Batchelor, "Analysis of Ozone and Nitric Acid in Spring and Summer Arctic Pollution using Aircraft, Ground-based, Satellite Observations and Mozart-4 Model: Source Attribution and Partitioning", *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, no. 1, pp. 237-259, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-12-237-2012>
- [3] Korea Environment Corporation. Introduction of AirKorea [Internet], Korea Environment Corporation, Available From: <http://www.airkorea.or.kr/airinfo>. (accessed Mar. 5, 2018)
- [4] J. H. Yoon, W. H. Jeong, S. M. Lee, D. H. Han, H. J. Jeon, S. W. Shon, J. M. Lee, A Study on Establishment of Utilization System of Environmental Monitoring Work for Environmental Pollution Measurement Data, Ministry of Environment, pp. 10-18, 2016.
- [5] K. Y. Hwang, "Environmental Inspection and Control - Present State and Policy Direction", *Korean Environmental Law Research*, vol. 37, no. 2, pp. 75-101, 2015.
- [6] Y. J. Kim, Integrated Diagnostics and Forecasting of Atmospheric Environment, Gwangju Institute of Science and Technology, pp. 4-7, 2013.
- [7] N. W. Cho, J. C. Lee, D. H. Kim, J. H. Shim, Development of long-distance harmful gas detection and monitoring technology, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 126-127, 2015.
- [8] T. Elias, J. Sutton, C. Oppenheimer, K. A. Horton, H. Garbeil, V. Tsanev, A. J. S. McGongle, G. Williams-Jones, "Comparison of COSPEC and Two Miniature Ultraviolet Spectrometer Systems for SO₂ Measurements using Scattered Sunlight", *Bulletin of Volcanology*, vol. 68, no. 4, pp. 313-322, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0026-5>
- [9] K. V. Chance, X. Liu, R. M. Suleiman, D. E. Flittner, J. Al-Saadi, S. J. Janz, "Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (TEMPO)", *Proc. of SPIE*, 88660D, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2024479>

신 정 일(Jung-Il Shin)

[정회원]



- 2007년 2월 : 인하대학교 대학원 지리정보공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 인하대학교 대학원 지리정보공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 ~ 2014년 7월 : 극지연구소 연구원
- 2014년 8월 ~ 현재 : 주식회사 지오스토리 연구소장

<관심분야>

원격탐사, 지리정보, 초분광센서

임 성 하(Seong-Ha Lim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 전남대학교 건축학과 졸업
- 2007년 4월 ~ 현재 : 한국국토정보공사

<관심분야>

원격탐사, 지리정보, 초분광센서

김 익 재(Ik-Jae Kim)

[정회원]



- 2015년 8월 : 가톨릭관동대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 주식회사 지오스토리 기술연구소

<관심분야>

원격탐사, 지리정보, 초분광센서

최 민 재(Minjae Choi)

[정회원]



- 2014년 2월 : 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학부(공학석사)
- 2014년 6월 ~ 2017년 6월 : 국립재난안전연구원 연구원
- 2017년 6월 ~ 현재 : 한국국토정보공사

<관심분야>

원격탐사, 지리정보, 초분광센서