


지상 기반 태양 UV 산란광 관측을 이용한 이산화황 경사칼럼농도 산출 시 파장 구간 및 흡수단면적에 따른 영향 조사

박 경¹, 공부주², 김민지³, 이한림^{4*} 


¹국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 석사과정생

²국립환경과학원 대기공학연구과 연구관

³국립환경과학원 대기공학연구과 연구사

⁴국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공 교수

Investigation of the Effects of Wavelength Range and Absorption Cross-Section on Sulfur Dioxide Slant Column Density Retrieval Using Ground-Based UV Scattered Sunlight Measurement

Gyeong Park¹, Buju Gong², Minji Kim³, Hanlim Lee^{4*} 

¹Master Student, Major of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

²Senior Researcher, Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

³Researcher, Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

⁴Professor, Major of Geomatics Engineering, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

Abstract: We investigated the effect of spectral fitting wavelength interval variations and selection of absorption cross-section on the sulfur dioxide slant column density (SCD) retrievals from the scattered sunlight observation using a UV-Vis hyperspectral instrument. The sulfur dioxide slant column densities were retrieved from the combinations of multiple spectral fitting intervals and absorption cross-sections. The observation was carried out at the site 0.53 km away from a combustion site located in Gimhae from December 1, 2023, to January 23, 2024. The radiances were obtained on the line of measurement sight toward the stack of the combustion facility. The best spectral fitting intervals were found to be from 305.7 to 321.1 nm. In terms of the absorption cross-section dependency, the SO₂ (293 K), O₃ (223 K, 243 K) show the best spectral fitting for the observed radiances with both the smallest fitting residual and SCD error. The effects of the fitting interval and cross sections found in this study can be useful information for improving SO₂ retrievals based on UV hyperspectral measurements.

Keywords: Sulfur dioxide, Remote sensing, Differential optical absorption spectroscopy

요약: 본 연구에서는 차등흡수분광법(differential optical absorption spectroscopy)을 이용하여 지상 기반 태양 산란광 관측자료로부터 이산화황 경사칼럼농도(slant column density)를 산출할 때 다양한 피팅 파장 구간 및 흡수단면적이 미치는 영향을 확인하였다. 2023년 12월 1일부터 2024년 1월 23일까지 김해시에서 지상 기반 원격 관측 장비로 관측된 자료를 사용하여 선행 연구 기반의 피팅 파장 구간과 흡수단면적 각각 5가

Received: July 31, 2024

Revised: August 12, 2024

Accepted: August 19, 2024

Published: August 31, 2024

Corresponding author:

Hanlim Lee

E-mail: hllee@pknu.ac.kr

지 조건으로 이산화황 경사칼럼농도를 산출하였다. 5가지의 피팅 파장 구간 중 305.7–321.1 nm의 구간에서 피팅 후 잔여 신호와 이산화황 산출 오차를 고려한 산출 불확실성이 최소로 확인되었다. 흡수단면적의 경우 이산화황(293 K) 및 오존(223 K, 243 K) 흡수단면적을 사용하여 산출하는 조건의 피팅 후 잔여 신호와 산출 오차가 가장 작았다. 피팅 파장 구간 조사에 사용한 흡수단면적 기준과 4가지의 흡수단면적 조건으로 산출된 이산화황 경사층적분농도는 높은 상관성을 보였다.

주요어: 이산화황, 원격 탐사, 차등흡수분광법

1. 서론

이산화황은 주요 대기오염물질 중 하나로 대표적인 오염 규제 물질이다(Gauderman et al., 2002). 이산화황은 대류권 황 순환의 주요 구성 성분으로 다이메틸설파이드(dimethyl sulfide), 화산 폭발 등의 자연적인 요인과 산업화 과정의 산업공정과 황을 포함하는 화석연료 연소 및 광석 제련 등의 인위적인 요인에 의해 배출된다(Langner and Rodhe, 1991; Smith et al., 2001). 이산화황의 인위적인 배출은 전 세계 이산화황 배출량의 70%로 황 순환에서 가장 주요한 양적 배출요인으로 여겨진다(Berglen et al., 2004; Faloon, 2009). 이산화황은 산성비를 유발하고 2차 오염물질인 황산염 에어로졸(aerosol)을 형성하는 데 크게 기여한다(Chestnut and Mills, 2005). 황을 포함한 산성비는 자연 환경 및 농업에 부정적인 영향을 주고 건물 표면을 부식시킨다. 황산염 에어로졸 입자는 인간의 건강을 손상시키고 가시성 감소를 유발한다. 특히 황산염 에어로졸은 도시에서 발생하는 미세먼지의 주요 공급원이며, 이는 심각한 대기 오염 문제의 원인이 된다(Meng et al., 2010).

이산화황의 경우 단기간 노출에도 인체의 점막을 자극하며 호흡기 및 심혈관계에 큰 영향을 미치기(Clark et al., 2010) 때문에 국내 기준의 대기환경기준물질에 포함되어 엄격하게 규제하고 있다. 이로 인해 산업단지 등에서 인위적으로 배출되는 이산화황에 대한 모니터링의 필요성이 계속 대두되고 있다. 이산화황은 지점 측정 방법과 원격 측정 방법을 사용하여 모니터링되고 있다. 지점 측정 방법에는 화학발광법(Galan et al., 1997) 등이 있으며, 이는 원격 측정 방법에 비해 높은 정확도를 가지지만 공간 해상도가 매우 작다(Zheng et al., 2018). 따라서 넓은 범위의 모니터링을 위하여 원격 관측을 이용한 이산화황 측정이 활발히 이루어지고 있다. 위성 기반의 원격 관측을 이용한 이산화황 측정은 1978년에 발사된 Nimbus-7 위성의 TOMS(Krueger et al., 1990) 센서를 시작으로, GOME(Eisinger and Burrows, 1998)와 SCIAMACHY(Richter et al., 2006)를 이용하여 수행하였고, OMI(Krotkov et al., 2006)와 GOME-2(Nowlan et al., 2011), OMPS(Yang et al., 2013), TROPOMI(Theys et al., 2017) 등 다양한 저궤도 위성에서 계속 수행되고 있다. 2020년에 발사된 천리안 2B호의 환경탐

재체 GEMS(Park et al., 2021)와 2023년에 발사된 TEMPO(Zoogman et al., 2017) 등 정지궤도 위성을 이용하여 각각 한반도 및 동아시아 지역과 북미 지역에서 이산화황 모니터링을 수행하고 있다. 위성을 이용한 이산화황 측정은 짧은 시간에 넓은 영역을 측정할 수 있다는 장점이 있지만 지표에 존재하는 이산화황에 대한 민감도가 지상 기반의 측정보다 낮다. 이에 따라 산업단지 굴뚝 등 점 오염원에서 배출되는 이산화황을 모니터링 하기 위해서는 위성을 이용한 원격 관측보다 지상 기반의 원격 관측이 더욱 유용하게 활용된다.

본 연구에서는 지상 기반 원격 관측을 수행하여 관측 자료를 얻고, 차등흡수분광법(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)을 활용하여 이산화황 경사칼럼농도를 산출하였다. 차등흡수분광법은 자외선 영역과 가시광선 영역에서 미량기체의 농도를 산출할 때 널리 사용되는 방법으로 산란되는 태양광을 광원으로 사용하여 원격 관측이 가능하다(Platt and Stutz, 2008). Multi-axis (MAX)-DOAS는 지상에서 지평선을 바라보고 다수의 고도 각도로 산란된 태양광을 측정하기 때문에 지면에 가깝게 존재하는 흡수체에 대한 민감도가 증가한다(Hönninger et al., 2004). Lee et al. (2009)은 Imaging-DOAS를 사용하여 평택 발전소의 굴뚝에서 배출되는 이산화질소 농도를 산출하였고, Pikelnaya et al. (2013)은 Imaging-DOAS를 사용하여 석유화학 공장의 굴뚝에서 배출되는 포름알데히드(formaldehyde)와 이산화황 배출을 감지하는 연구를 수행하였다. Schreier et al. (2015)은 MAX-DOAS 기술을 활용하여 중국 북부와 솔루해의 선박에서 배출되는 이산화질소와 이산화황 농도를 산출하였고, Seyler et al. (2017)은 MAX-DOAS 기술을 이용하여 독일 엘베 강의 선박에서 배출되는 이산화질소와 이산화황의 농도를 산출하고 분석하였다.

본 연구에서는 MAX-DOAS 방식을 활용하여 자원회수시설의 굴뚝을 중심으로 지상 기반의 원격 관측을 수행하였다. 차등흡수분광법과 같이 분광 피팅 방법을 이용하여 산출하는 경우 스펙트럼 피팅 파장 구간과 흡수단면적에 따라 이산화황 경사칼럼농도의 산출 결과에 영향을 미친다(Javed et al., 2021). 본 연구에서는 이산화황 경사칼럼농도를 산출한 선행 연구를 참고하여 이산화황 경사칼럼농도 산출 시 스펙트럼 피팅 파장 구간과 흡수단면적에 따른 영향을 조사하고 흡수단면적의 영향에 대한 산출 결과를 비교하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1. 연구 지역 및 자료

본 연구에서 사용한 지상 기반의 원격 관측 장비는 2023년 12월 1일부터 2024년 1월 23일까지 김해시 부곡마을회관의 옥상(35.2109°N, 128.8021°E)에 설치되어 김해시 자원회수시설을 바라보고 MAX-DOAS 관측을 수행하였다. 해당 장비는 Avantes 사의 Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) linear image sensor를 디텍터로 사용하여 400 μm core diameter의 광섬유 케이블을 통해 분광기와 연결되어 있으며 헤드센서와 스펙트로미터(spectrometer)가 일체형으로 제작되었다. 280–795 nm의 넓은 파장 범위에서 약 0.5 nm의 파장 분해능(full width at half maximum)으로 관측이 가능하다. Fig. 1을 보면 장비의 전모를 확인할 수 있다. 관측 기간동안 장비의 방위각은 자원회수시설 방향으로 고정하고, MAX-DOAS 스캔의 고도각은 9개(14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 30, 90°)를 설정하였다. 굴뚝에서 배출되기 시작하는 고도각이 약 18°에 위치하여 18°를 기준으로 촘촘히 6개의 각도를 설정하고 배경농도 관측을 위해 30°와 90°를 추가하였다.

본 연구에서는 2023년 12월 1일부터 2024년 1월 23일까지 관측된



Fig. 1. UV-Vis hyperspectral instrument.

데이터에서 기상청의 김해시 과거관측 자료와 김해시 지상 종합기상관측(Automated Synoptic Observing System) 자료를 기준으로 고운량 및 악천후에 해당되는 날을 제외한 데이터를 연구 자료로 사용하였다. 운량의 경우 10분위 중하층운량에서 5 초과에 해당되는 시간대의 데이터를 제외하였다. 모든 스펙트럼 데이터에 대해 기기함수 노이즈(dark current, offset)를 제거하고 관측된 빛의 세기와 관측 시간을 이용하여 L1 자료를 생성하였다.

2.2. 연구 방법

본 연구에서는 차등흡수분광법을 이용하여 이산화황 경사칼럼농도를 산출하였다. 차등흡수분광법의 원리는 광원에서 나오는 빛이 흡수 매질을 통과하는 동안 빛의 세기가 약해지는 것으로 Beer-Lambert 법칙을 기반으로 설명된다. 타겟 미량 기체의 흡수 특성이 강한 파장 구간에서 각각의 미량기체의 파장에 따른 흡수단면적 특성을 빠른 변화와 느린 변화의 특성을 구분하여 계산한다. 경사칼럼 농도는 유효 광경로를 따라 적산된 미량기체의 농도와 측정된 배경 스펙트럼의 흡수체 양 사이의 차이로 계산할 수 있다. MAX-DOAS 관측에서 얻은 스펙트럼은 BIRA-IASB (<https://uv-vis.aeronomie.be/software/QDOAS/>)에서 개발한 QDOAS 소프트웨어(Danckaert et al., 2017)를 사용하여 분석되었다. 이산화황 경사칼럼농도를 산출하기 위한 배경 스펙트럼은 관측 기간 중 날씨가 맑고 이산화황 농도가 가장 낮은 2024년 1월 15일 정오 시간의 관측 자료를 사용하였다.

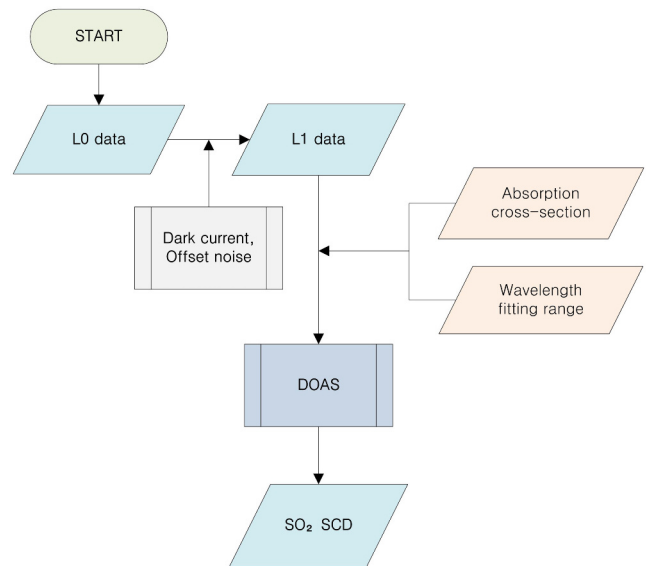


Fig. 2. Flow chart of SO₂ SCD retrieval.

2.2.1. 피팅 파장 구간에 따른 영향 조사

본 연구에서는 피팅 파장 구간에 따른 영향을 파악하기 위해 지상 기반 MAX-DOAS 관측을 통해 이산화황 농도를 산출한 선행 연구에서

Table 1. List of the wavelength range used by each study

Reference	Wavelength range (nm)	Length (nm)
Wang et al. (2017)	307.5–330	22.5
Schreier et al. (2015)	307.5–328	20.5
Pikelnaya et al. (2013)	305.7–321.1	15.4
Seyler et al. (2017)	307.5–317.5	10
Hong et al. (2021)	307.5–315	7.5

사용되었던 피팅 파장 구간을 이용하였다. Wang et al. (2017)과 Hong et al. (2021)에서 대류권 이산화황 산출 연구에 사용된 피팅 파장 구간과 Pikelnaya et al. (2013), Schreier et al. (2015), Seyler et al. (2017)에서 석유화학 공장의 굴뚝 및 선박에서 배출되는 이산화황을 산출하기 위해 선택된 피팅 파장 구간을 기반으로 이산화황 경사칼럼농도 산출을 위한 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사하였다. Table 1은 본 연구에서 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사하기 위해 선행 연구를 기반으로 선정된 피팅 파장 구간을 나타낸다. 피팅 파장 구간의 간격이 긴 순서대로 나열하였으며, 이산화황의 흡수가 강한 300–330 nm 사이의 자외선 영역에서 모두 다른 5개의 피팅 파장 구간을 확인할 수 있다.

이산화황 농도를 산출한 선행 연구에서 주로 사용된 흡수단면적을 고정으로 사용하여 피팅 파장 구간에 대한 영향을 조사하였다. 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사하기 위한 흡수단면적으로 이산화황(293 K; Bogumil et al., 2003), 이산화질소(294 K; Vandaele et al., 1998), 오존(223 K, 243 K; Serdyuchenko et al., 2014), 포름알데히드(297 K; Meller and Moortgat, 2000)를 사용하였다. 이산화황 흡수단면적인 293 K (Bogumil et al., 2003)는 Wang et al. (2017), Schreier et al. (2015), Seyler et al. (2017)에서 사용되었다.

2.2.2. 흡수단면적에 따른 영향 조사

피팅 파장 구간에 따른 조사 결과를 기반으로 산출 정확도가 가장 높은 피팅 파장 구간을 사용하여 흡수단면적에 대한 영향을 조사하

였다. Table 2는 본 연구에서 흡수단면적에 대한 영향을 조사하기 위해 선행 연구를 기반으로 선정한 흡수단면적 조건을 나타낸다. 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사할 때 사용한 흡수단면적 조건을 기준으로 이산화황과 오존, 포름알데히드의 흡수단면적 변화에 대해서 각 흡수단면적 조건을 구성하여 흡수단면적에 대한 영향을 조사하였으며, 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사할 때 사용한 흡수단면적 조건으로 산출한 결과와 각각 비교를 수행하였다. 기준이 되는 이산화황 흡수단면적인 Case 1의 이산화황 흡수단면적은 Pikelnaya et al. (2013)에서 사용된 흡수단면적이고, Case 2의 이산화황 흡수단면적은 Hong et al. (2021)에서 사용되었다. Case 3에서는 Wang et al. (2017)에서 사용한 오존 흡수단면적을 사용하였다. 그리고 Case 4에서는 Schreier et al. (2015), Seyler et al. (2017)을 참고하여 포름알데히드 흡수단면적을 제외하였다.

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 피팅 파장 구간에 따른 영향

본 연구에서는 각 피팅 파장 구간이 이산화황 경사칼럼농도 산출에 미치는 영향을 조사하고, 가장 안정적인 결과를 보인 피팅 파장구간을 선정하여 흡수단면적에 대한 영향을 조사하였다. 피팅 파장 구간에 대한 영향을 조사하기 위해 Table 1의 피팅 파장 구간 5개에 대해서 이산화황 경사칼럼농도를 산출하였다. Fig. 3과 Table 3을 통해 5개의 피팅 파장 구간을 이용하여 산출된 이산화황 경사칼럼농도 산출 결과를 확인할 수 있다. Table 3에서 Hong et al. (2021)의 조건으로 산출된 개수가 1,335개로 가장 적었고, Pikelnaya et al. (2013)의 조건으로 산출된 개수가 1,707개로 가장 많았다. Wang et al. (2017)의 조건으로 산출된 개수는 1,379개로 두 번째로 적었고 Seyler et al. (2017), Schreier et al. (2015) 순서로 각각 1,532개, 1,555개의 데이터가 산출되었다. 이산화황 평균 경사칼럼농도 값은 파장 범위가 길수록 증가하였다.

피팅 파장 구간의 간격이 짧을수록 피팅 후 잔여 신호가 작아지고

Table 2. List of the absorption cross-section used by each study

Cross section	Cross-section used in the wavelength range test	Case 1 (SO ₂ 변경)	Case 2 (SO ₂ 변경)	Case 3 (O ₃ 변경)	Case 4 (HCHO 미포함)
SO ₂	293 K (Bogumil et al., 2003)	296 K (Vandaele et al., 1994)	298 K (Vandaele et al., 2009)	293 K (Bogumil et al., 2003)	293 K (Bogumil et al., 2003)
NO ₂	294 K (Vandaele et al., 1998)	294 K (Vandaele et al., 1998)	294 K (Vandaele et al., 1998)	294 K (Vandaele et al., 1998)	294 K (Vandaele et al., 1998)
O ₃	223 K, 243 K (Serdyuchenko et al., 2014)	223 K, 243 K (Serdyuchenko et al., 2014)	223 K, 243 K (Serdyuchenko et al., 2014)	223 K, 243 K (Bogumil et al., 2003)	223 K, 243 K (Serdyuchenko et al., 2014)
HCHO	297 K (Meller and Moortgat, 2000)	297 K (Meller and Moortgat, 2000)	297 K (Meller and Moortgat, 2000)	297 K (Meller and Moortgat, 2000)	-

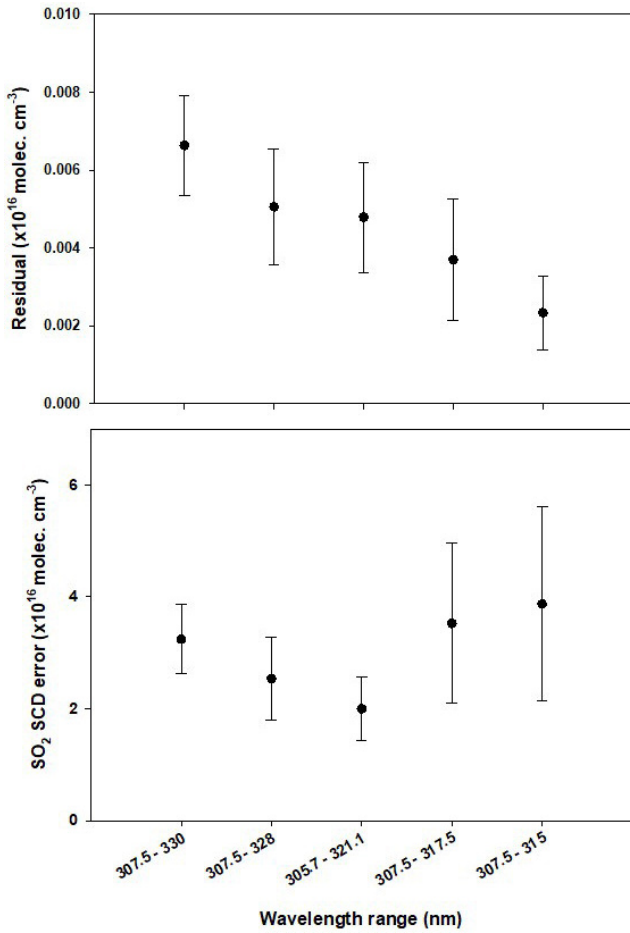


Fig. 3. Residual and SO₂ SCD error of wavelength ranges.

Table 3. Results of retrieval for each wavelength range

Wavelength range (nm)	No. of data	Residual (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³ *)	SO ₂ SCD (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³)	SO ₂ SCD error (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³)
307.5–330	1,379	6.631 × 10 ⁻³	4.233	3.246
307.5–328	1,555	5.052 × 10 ⁻³	4.696	2.540
305.7–321.1	1,707	4.788 × 10 ⁻³	6.246	1.998
307.5–317.5	1,532	3.699 × 10 ⁻³	9.580	3.525
307.5–315	1,335	2.333 × 10 ⁻³	10.076	3.872

Table 4. Results of retrieval for each case of absorption cross-section

Cross section	No. of data	Residual (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³)	SO ₂ SCD (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³)	SO ₂ SCD error (× 10 ¹⁶ molec. cm ⁻³)
Cross-section used in the wavelength range	1,707	4.788 × 10 ⁻³	6.246	1.998
Case 1	1,612	4.916 × 10 ⁻³	4.661	2.023
Case 2	1,613	4.940 × 10 ⁻³	4.499	1.974
Case 3	1,702	4.654 × 10 ⁻³	7.869	1.940
Case 4	1,697	5.082 × 10 ⁻³	6.632	2.085

이산화황 산출 오차는 작아지다가 간격이 10 nm 이하로 짧은 경우에는 산출 오차가 그전보다 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 피팅 후 잔여 신호는 해당 피팅 파장 구간에서 스펙트럼 피팅을 통해 설명되지 않는 신호를 의미하므로 피팅 후 잔여 신호가 큰 것은 이산화황 경사 칼럼농도 산출에 대한 불확실성이 큰 것으로 이해할 수 있다. 파장 간격이 20 nm 이상인 307.5–330 nm와 307.5–328 nm의 경우에는 피팅 후 잔여 신호와 산출 오차가 모두 비교적 큰 결과를 보였다. 파장 간격이 10 nm 이하인 307.5–317.5 nm와 307.5–315 nm의 경우에 잔여 신호는 작지만 산출 오차와 산출 오차의 표준편차가 크다. 파장 간격이 제일 짧은 피팅 파장 구간에 대한 결과는 피팅 후 잔여 신호가 가장 작지만 산출 오차가 가장 크고 산출 오차의 표준편차도 가장 크게 나왔다. 305.7–321.1 nm는 평균적인 잔여 신호의 결과를 보였으나 산출 오차가 가장 작고 산출되는 데이터의 수 또한 1,707개로 가장 많다.

흡수단면적에 대한 영향 조사 시 사용할 피팅 파장 구간을 선정할 때 안정적인 이산화황 경사칼럼농도 산출을 위해 각 피팅 파장 구간에 따른 피팅 후 잔여 신호와 이산화황 산출 오차를 고려하였고 산출된 데이터의 수도 함께 고려하였다. 이에 따라 흡수단면적에 대한 영향을 조사하기 위한 피팅 파장 구간은 Pikelnaya et al. (2013)에서 사용한 305.7–321.1 nm를 사용하였다. Table 2의 흡수단면적 조건으로 산출된 이산화황 경사칼럼농도 결과는 Table 4와 같다. 이산화황 흡수단면적을 변경한 Case 1과 Case 2의 조건으로 산출한 경우에 산출된 데이터 수가 각각 1,612개와 1,613개로 가장 적고 피팅 파장 구간을 조사할 때 사용한 흡수단면적 조건으로 산출한 경우의 데이터 개

수가 1,707개로 가장 많다. 이산화황 흡수단면적을 변경한 조건의 이산화황 평균 경사칼럼농도가 4.66×10^{16} molec. cm^{-3} (molecules/ cm^3), 4.50×10^{16} molec. cm^{-3} 로 기준의 이산화황 흡수단면적을 사용한 조건보다 비교적 낮은 값을 보였다. 오존 흡수단면적을 변경한 Case 3의 경우에는 1,702개가 산출되어 두 번째로 데이터 개수가 가장 많았고, 가장 낮은 피팅 후 잔여 신호와 이산화황 산출오차를 보였다. 포름알데히드 흡수단면적을 제외한 Case 4의 조건으로 산출한 경우에는 기준 흡수단면적 조건과 가장 유사한 평균 이산화황 경사칼럼농도 값을 보였으나 피팅 후 잔여신호와 이산화황 산출 오차가 가장 큰 결과를 보였다.

각 흡수단면적의 조건에 따라 산출된 이산화황 경사칼럼농도의 차이를 확인하기 위해 피팅 파장 구간에 대한 영향을 조사할 때 사용한 흡수단면적 조건의 산출 결과를 기준으로 4가지 조건에 대한 산

출 결과들과 비교를 수행하였다(Fig. 4). Fig. 4의 x축은 피팅 파장 구간에 대한 영향을 조사할 때 사용된 흡수단면적 조건으로 산출한 이산화황 경사칼럼농도를 말한다. 모든 조건과의 비교 결과에서 높은 상관성을 보인다. 오존 흡수단면적을 변경한 Case 3과 비교하였을 때 상관계수가 0.75로 가장 작게 나왔지만 기울기(slope)는 0.92로 가장 높았다. 기울기가 가장 높았음에도 Case 3의 조건으로 산출된 평균 이산화황 경사칼럼농도가 기준이 되는 조건에서 산출된 평균 농도보다 높아서 절편(interceptor) 또한 가장 크기 때문에 비교적 낮은 상관계수를 보이는 것으로 알 수 있다. 이산화황 흡수단면적을 변경한 Case 1과 Case 2의 경우에는 다른 조건과 비교한 결과에 비해 기울기가 낮게 나왔지만, 포름알데히드 흡수단면적을 제외한 Case 4와의 비교 결과에서는 상관계수와 기울기가 모두 높게 나왔다.

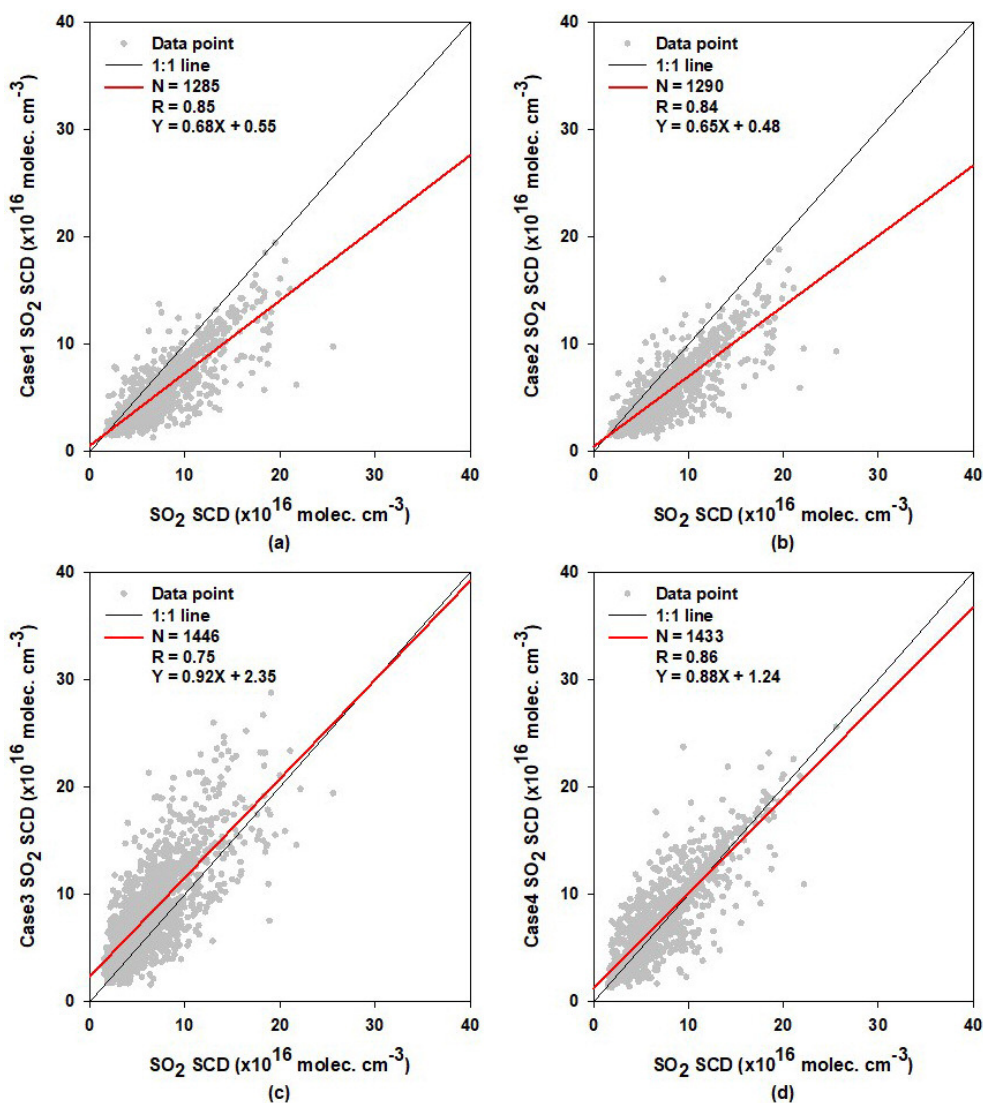


Fig. 4. Scatter plots of SO₂ SCDs retrieved by cross-section used in the wavelength range test and each case of absorption cross-section.

4. 결론

본 연구에서는 지상 기반 원격 관측 장비의 태양 산란광 관측 자료를 이용하여 이산화황 경사칼럼농도 산출 시 피팅 파장 구간과 흡수단면적이 미치는 영향을 조사하였다. 이산화황의 흡수 특성이 강한 300–330 nm 사이의 파장 구간 5개에 대해 피팅 파장 구간에 따른 영향을 조사하였고, 산출 정확도가 가장 높은 피팅 파장 구간을 선정하여 5개의 흡수단면적 조건에 대한 영향을 조사하였다. 각 피팅 파장 구간을 적용한 이산화황 경사칼럼농도의 평균 산출 오차는 $1.99 \times 10^{16} - 3.87 \times 10^{16}$ molec. cm⁻³로 산출되었다. 산출 결과에서 피팅 후 잔여 신호, 이산화황 산출 오차, 산출된 데이터 수 등을 고려하였을 때 305.7–321.1 nm의 파장 구간이 가장 작은 산출 오차와 가장 많은 산출 데이터 수를 가지고 안정적인 산출 결과를 보였다. 흡수단면적 조건에 대해 산출된 이산화황 평균 경사칼럼농도는 $4.50 \times 10^{16} - 7.87 \times 10^{16}$ molec. cm⁻³이고, 평균 경사칼럼농도 산출 오차는 $1.94 \times 10^{16} - 2.09 \times 10^{16}$ molec. cm⁻³이다.

Bogumil et al. (2003)의 이산화황 흡수단면적 및 오존 흡수단면적을 함께 사용하는 흡수단면적 조건으로 이산화황 경사칼럼농도를 산출하는 경우에 가장 낮은 피팅 후 잔여 신호와 산출 오차를 보였다. Bogumil et al. (2003)의 이산화황 흡수단면적을 사용한 조건으로 산출한 이산화황 경사칼럼농도보다 Vandaele et al. (1994, 2009)의 이산화황 흡수단면적을 사용한 조건의 이산화황 경사칼럼농도가 더 낮은 평균치를 보였다. 각 흡수단면적의 조건에 따른 이산화황 경사칼럼농도 산출 결과를 비교했을 때 상관계수가 0.75–0.86로 나타나며 높은 상관성을 보였다. 본 연구에서는 피팅 파장 구간과 흡수단면적에 대해 각각 5가지의 조건으로 나누어 지상 기반 원격 관측 장비의 태양 산란광 관측자료로부터 이산화황 경사칼럼농도 산출을 수행하였다. 향후 더욱 다양하고 정밀한 조사를 통하여 자외선 파장대의 이산화황 농도 산출에 대한 정확도를 더욱 높일 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 2024년도 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구임(NIER-2024-01-02-028).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Berglen, T. F., Bernsten, T. K., Isaksen, I. S., and Sundet, J. K., 2004. A global model of the coupled sulfur/oxidant chemistry in the troposphere: The sulfur cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D19). <https://doi.org/10.1029/2003JD003948>
- Bogumil, K., Orphal, J., Homann, T., Voigt, S., Spietz, P., Fleischmann, O. C., et al., 2003. Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: Instrument characterization and reference data for atmospheric remote-sensing in the 230–2380 nm region. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157(2–3), 167–184. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00062-5)
- Chestnut, L. G., and Mills, D. M., 2005. A fresh look at the benefits and costs of the US acid rain program. *Journal of Environmental Management*, 77(3), 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.05.014>
- Clark, N. A., Demers, P. A., Karr, C. J., Koehoorn, M., Lencar, C., Tamburic, L., and Brauer, M., 2010. Effect of early life exposure to air pollution on development of childhood asthma. *Environmental Health Perspectives*, 118(2), 284–290. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900916>
- Danckaert, T., Fayt, C., Van Roozendaal, M., De Smedt, I., Letocart, V., Merlaud, A., and Pinardi, G., 2017. *QDOAS software user manual*. Royal Belgian Institute for Space Aeronomy. https://uv-vis.aeronomie.be/software/QDOAS/QDOAS_manual.pdf
- Eisinger, M., and Burrows, J. P., 1998. Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument. *Geophysical Research Letters*, 25(22), 4177–4180. <https://doi.org/10.1029/1998GL900128>
- Faloon, I., 2009. Sulfur processing in the marine atmospheric boundary layer: A review and critical assessment of modeling uncertainties. *Atmospheric Environment*, 43(18), 2841–2854. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.043>
- Galan, G., Navas, M. J., and Jimenez, A. M., 1997. Determination of sulfur compounds in air by chemiluminescence. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 68(4), 497–510. <https://doi.org/10.1080/03067319708030849>
- Gauderman, W. J., Gilliland, G. F., Vora, H., Avol, E., Stram, D., McConnell, R., et al., 2002. Association between air pollution and lung function growth in southern California children: Results from a second cohort. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 166(1), 76–84. <https://doi.org/10.1164/rccm.2111021>
- Hong, Q., Liu, C., Hu, Q., Xing, C., Tan, W., Liu, T., and Liu, J., 2021. Vertical distributions of tropospheric SO₂ based on MAX-DOAS

- observations: Investigating the impacts of regional transport at different heights in the boundary layer. *Journal of Environmental Sciences*, 103, 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.036>
- Hönninger, G., Von Friedeburg, C., and Platt, U., 2004. Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(1), 231–254. <https://doi.org/10.5194/acp-4-231-2004>
- Javed, Z., Tanvir, A., Bilal, M., Su, W., Xia, C., Rehman, A., et al., 2021. Recommendations for HCHO and SO₂ retrieval settings from MAX-DOAS observations under different meteorological conditions. *Remote Sensing*, 13(12), 2244. <https://doi.org/10.3390/rs13122244>
- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., and Yang, K., 2006. Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1259–1266. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.861932>
- Krueger, A. J., Walter, L. S., Schnetzler, C. C., and Doiron, S. D., 1990. TOMS measurement of the sulfur dioxide emitted during the 1985 Nevado del Ruiz eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 7–15. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90081-P](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90081-P)
- Langner, J., and Rodhe, H., 1991. A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 13, 225–263. <https://doi.org/10.1007/BF00058134>
- Lee, H., Kim, Y. J., and Lee, C., 2009. Estimation of the rate of increase in nitrogen dioxide concentrations from power plant stacks using an imaging-DOAS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152, 61–70. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0296-4>
- Meller, R., and Moortgat, G. K., 2000. Temperature dependence of the absorption cross sections of formaldehyde between 223 and 323 K in the wavelength range 225–375 nm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D6), 7089–7101. <https://doi.org/10.1029/1999JD901074>
- Meng, Z. Y., Xu, X. B., Wang, T., Zhang, X. Y., Yu, X. L., Wang, S. F., et al., 2010. Ambient sulfur dioxide, nitrogen dioxide, and ammonia at ten background and rural sites in China during 2007–2008. *Atmospheric Environment*, 44(21–22), 2625–2631. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.008>
- Nowlan, C. R., Liu, X., Chance, K., Cai, Z., Kurosu, T. P., Lee, C., and Martin, R. V., 2011. Retrievals of sulfur dioxide from the Global Ozone Monitoring Experiment 2 (GOME-2) using an optimal estimation approach: Algorithm and initial validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D18). <https://doi.org/10.1029/2011JD015808>
- Park, J., Choi, W., Lee, H. M., Park, R. J., Kim, S. Y., Yu, J. A., et al., 2021. Effect of error in SO₂ slant column density on the accuracy of SO₂ transport flow rate estimates based on GEMS synthetic radiances. *Remote Sensing*, 13(15), 3047. <https://doi.org/10.3390/rs13153047>
- Pikelnaya, O., Flynn, J. H., Tsai, C., and Stutz, J., 2013. Imaging DOAS detection of primary formaldehyde and sulfur dioxide emissions from petrochemical flares. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8716–8728. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50643>
- Platt, U., and Stutz, J., 2008. Differential absorption spectroscopy. In: *Differential Optical Absorption Spectroscopy. Physics of Earth and Space Environments*, Springer, pp. 135–174. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75776-4_6
- Richter, A., Wittrock, F., and Burrows, J. P., 2006. SO₂ measurements with SCIAMACHY. In *Proceedings of the Atmospheric Science Conference*, Frascati, Italy, May 8–12, pp. 8–12.
- Schreier, S. F., Peters, E., Richter, A., Lampel, J., Wittrock, F., and Burrows, J. P., 2015. Ship-based MAX-DOAS measurements of tropospheric NO₂ and SO₂ in the South China and Sulu Sea. *Atmospheric Environment*, 102, 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.015>
- Serdyuchenko, A., Gorshelev, V., Weber, M., Chehade, W., and Burrows, J. P., 2014. High spectral resolution ozone absorption cross-sections—Part 2: Temperature dependence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2), 625–636. <https://doi.org/10.5194/amt-7-625-2014>
- Seyler, A., Wittrock, F., Kattner, L., Mathieu-Üffing, B., Peters, E., Richter, A., et al., 2017. Monitoring shipping emissions in the German Bight using MAX-DOAS measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(18), 10997–11023. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10997-2017>
- Smith, S. J., Pitcher, H., and Wigley, T. M., 2001. Global and regional anthropogenic sulfur dioxide emissions. *Global and Planetary Change*, 29(1–2), 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00057-6)
- Theys, N., De Smedt, I., Yu, H., Danckaert, T., van Gent, J., Hörmann, C., et al., 2017. Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: Algorithm theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(1), 119–153. <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
- Vandaele, A. C., Hermans, C., and Fally, S., 2009. Fourier transform measurements of SO₂ absorption cross sections: II. Temperature dependence in the 29000–44000 cm⁻¹ (227–345 nm) region. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,

- 110(18), 2115–2126. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.05.006>
- Vandaele, A. C., Hermans, C., Simon, P. C., Carleer, M., Colin, R., Fally, S., et al., 1998. Measurements of the NO₂ absorption cross-section from 42 000 cm⁻¹ to 10 000 cm⁻¹ (238–1000 nm) at 220 K and 294 K. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 59(3–5), 171–184. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(97\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(97)00168-4)
- Vandaele, A. C., Simon, P. C., Guilmot, J. M., Carleer, M., and Colin, R., 1994. SO₂ absorption cross section measurement in the UV using a Fourier transform spectrometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D12), 25599–25605. <https://doi.org/10.1029/94JD02187>
- Wang, Y., Lampel, J., Xie, P., Beirle, S., Li, A., Wu, D., and Wagner, T., 2017. Ground-based MAX-DOAS observations of tropospheric aerosols, NO₂, SO₂ and HCHO in Wuxi, China, from 2011 to 2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 2189–2215. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2189-2017>
- Yang, K., Dickerson, R. R., Carn, S. A., Ge, C., and Wang, J., 2013. First observations of SO₂ from the satellite Suomi NPP OMPS: Widespread air pollution events over China. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4957–4962. <https://doi.org/10.1002/grl.50952>
- Zheng, C., Zhao, C., Li, Y., Wu, X., Zhang, K., Gao, J., et al., 2018. Spatial and temporal distribution of NO₂ and SO₂ in Inner Mongolia urban agglomeration obtained from satellite remote sensing and ground observations. *Atmospheric Environment*, 188, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.029>
- Zoogman, P., Liu, X., Suleiman, R. M., Pennington, W. F., Flittner, D. E., Al-Saadi, J. A., et al., 2017. Tropospheric emissions: Monitoring of pollution (TEMPO). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 186, 17–39. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.008>