

지표면 대기중 가스상오염물질 다경로 동시 원격 모니터링을 위한 CMP-DOAS 개발: 첫 개발 사례 및 이산화질소 측정 연구

Development of Concurrent Multi Path (CMP)-Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) for Remote Sensing of Surface Atmospheric Gases

이한림^{1),2),*} · 황정배^{2),4)} · 김 준¹⁾ · 노영민³⁾ · 원용관⁴⁾

¹⁾연세대학교 대기과학과, ²⁾(주) 스펙트로

³⁾광주과학기술원 환경공학과, ⁴⁾전남대학교 전자컴퓨터공학부

(2010년 5월 20일 접수, 2010년 6월 30일 수정, 2010년 7월 13일 채택)

Hanlim Lee^{1),2),*}, Jungbae Hwang^{2),4)}, Jhoon Kim¹⁾,
Youngmin Noh³⁾ and Yongkwan Won⁴⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

²⁾Spectro, Gwangju, Korea

³⁾Department of Environmental Science and Engineering,
Gwangju Institute of Science and Technology

⁴⁾School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University

(Received 20 May 2010, revised 30 June 2010, accepted 13 July 2010)

Abstract

Concurrent Multi Path-Differential Optical Absorption Spectroscopy (CMP-DOAS) is a novel active optical system to measure simultaneously ambient trace gases (such as NO₂, SO₂, O₃, and HCHO) present on several light paths. The CMP-DOAS system consists of a 2D CCD camera, spectrometer, receiving telescopes, and artificial light sources. The system receives spectra, which have been transported through several paths. It also covers wavelength ranges of which trace gases of interest share at the same time. This study presents the instrumental setup of a CMP-DOAS in detail. A field campaign for a comparative measurement was carried out at an urban site in Gwangju for a month on January 2009. NO₂ mixing ratios measured by the CMP-DOAS system and in-situ NO₂ analyzers were in good agreement by 83%. It demonstrates the high capacities of the CMP-DOAS technique to cover atmospheric trace gases dispersed across wide light paths.

Key words : CMP-DOAS, DOAS, NO₂, Spatially resolved measurement, Atmospheric remote sensing

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-2123-7616, E-mail : hanlimlee@yonsei.ac.kr

1. 서 론

대류권 지표면에 가까이 존재하는 다양한 미량기체들의 확산 및 분포상태를 모니터링 하는 것은 매우 어려운 과제이다. 특히, 이동하는 배출원이 존재하는 지역 및 대상지역이 복잡한 지형 특성을 가지고 있을 때는 확산상태를 파악하기가 더욱 어렵다. 복잡한 구조의 도로를 포함하고 있는 도시에서 가스상오염물질의 공간적 분포를 파악하는 것이 그 예이다. 이러한 관측장소에서는 미량기체의 확산을 정확히 이해하기 위해서는 관측장비의 높은 공간 및 시간 분해능이 요구된다. 높은 시간 분해능은 다양한 수동 및 능동형 광학검출방법을 이용하여 구현하는 것이 가능하다. 그러나 높은 공간 분해능은 라이더(Choi *et al.*, 2004)와 같은 매우 정교한 광학기술들에 의해 구현이 가능하다. 그러나 이렇게 정교함을 요구하는 기술들은 시스템을 구성하는데 있어 비교적 많은 비용을 필요로 한다.

CMP-DOAS (concurrent multi path differential optical absorption spectroscopy)는 지표면에 가까운 대기 중에 존재하는 미량기체의 농도를 다양한 경로에서 동시에 측정할 수 있는 새로운 측정기술이다. CMP-DOAS는 기존의 long path-DOAS (Lee *et al.*, 2005a, b, c) 기술을 바탕으로 한 대의 시스템으로 다양한 광경로에 존재하는 미량기체를 실시간 측정할 수 있다. CMP-DOAS 시스템과 한 지점에 위치하는 광원 사이를 광경로라고 한다. 각각의 광경로를 통해 측정된 스펙트럼은 차등흡수분광법을 이용하여 분석하며, 경로상의 칼럼농도를 제공한다. 칼럼농도는 정의한 광경로의 길이 (light path length)로 나누어 혼합비로 환산할 수 있다. 또한, CMP-DOAS 시스템에 탑재하는 그레이팅 (grating)과 같은 광학구성요소에 따라 광역대의 파장영역을 볼 수 있다. 따라서 해당 파장영역에서 흡수 및 산란특성을 가지는 여러 가스상물질의 측정이 가능하다.

본 연구는 이차원 CCC를 검출기로 이용하여 두 개 이상의 광경로를 통해 들어오는 빛을 수신하는 것이 가능하다. 이를 통해 각각의 광경로에 존재하는 대기 미량기체의 공간적 농도분포를 동시에 실시간 측정 하는 첫 연구사례이다. Leigh *et al.* (2007, 2006)의 선행연구에 의하면 인공광원을 이용하는 본 연구

와 달리 대기 중 미량기체의 칼럼밀도를 측정할 수 있는 태양산란광을 이용하는 Concurrent MAX-DOAS의 개발 및 이산화질소의 칼럼밀도를 측정한 사례에 대해 논하고 있다. Leigh *et al.* (2007, 2006)에서 소개한 Concurrent MAX-DOAS는 자연광인 태양산란광을 이용하기 때문에 대기 가스물질들의 수직 분포 등을 측정하는데 응용할 수 있다. 그러나 현재의 기술수준으로는 정확한 흡수 광경로 길이를 측정할 수 없으므로 대상 가스상물질의 칼럼밀도 정보만을 제공할 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 CMP-DOAS의 경우 인공광원을 이용함으로써 광경로 길이를 정확히 파악할 수 있으므로 대상기체의 농도 정보를 제공할 수 있다. 또한 태양광을 사용하는 경우 저녁관측이 현실적으로 어려우나 본 연구에서는 기존의 Concurrent MAX-DOAS를 능동형 CMP-DOAS로 적용하여 낮과 밤 연속 관측이 가능하다. 특히, 자연광을 이용하는 수동형보다 외부 환경 및 날씨의 영향을 받지 않고 지속적인 관측을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 처음으로 개발한 인공광원을 광원으로 하는 능동형 CMP-DOAS의 원리를 소개하고자 하였다. 그리고 야외관측캠페인 기간 동안 CMP-DOAS를 이용하여 두 광경로에서 동시에 이산화질소를 측정한 첫 응용사례에 대해 소개하고자 한다.

2. CMP-DOAS 원리 및 구조

CMP-DOAS는 인공광원을 탑재한 광원, 광원을 수신하는 수신광학계, 수신한 광신호를 광경로 및 파장에 따라 분해하는 분광기와 분해한 광신호를 기록하는 이차원 CCD (charge coupled device) 검출기로 구성되어 있다. 그림 1은 위에서 바라본 CMP-DOAS의 구성을 보여주고 있다. 관측대상 지점에 원하는 파장영역을 포함하는 광원들을 위치시키고 시스템의 수신 망원경들로 광원들로부터 조사한 빛을 수신 및 집광시켜 광섬유를 통해 분광기로 광신호를 전송한다. 이때, 광섬유는 그림 1에서 보는 바와 같이 서로 직렬배열하여 이차원 toroidal 반사경의 상하부에 각각 조사하게 된다. 조사된 빛은 그레이팅을 통해 파장에 따라 분광되고, 집광반사경에 의해 이차원 검출기 칩으로 집광된다.

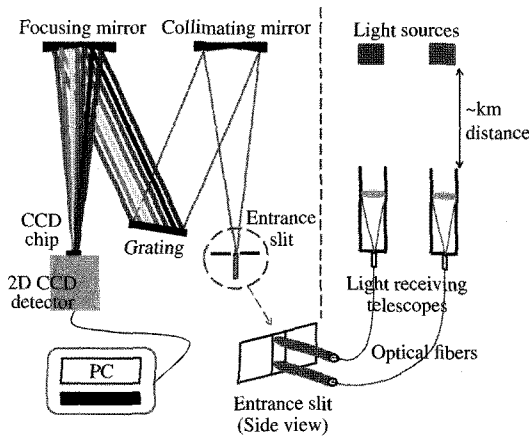


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up for a Concurrent Multi Path DOAS (CMP-DOAS).

본 연구에서 개발한 CMP-DOAS 시스템은 백색광을 낼 수 있는 Xenon램프를 광원으로 사용하였다. 램프의 빛을 반사경을 이용하여 평형광을 만들어 빛의 확산에 의한 손실을 최소화하였다. 시스템의 수신망원경은 볼록 석영렌즈 ($f=200\text{ mm}$, $\phi=50.8\text{ mm}$)와 광섬유로 구성되어 있다. 수신망원경을 하나로 하며, 분리한 움직임 가지는 모터 (stepper-motor)를 이용하여 여러 개의 광원을 스캔하는 방식도 가능하다. 그러나 동시에 같은 광경로에서 수신하는 광신호를 측정하기 위해 광경로의 수와 같은 두 개의 수신망원경을 사용하였다. 광원수신망원경을 통해 들어온 빛은 광섬유를 통해 분광기로 전송한다. 본 연구에서는 두 개의 광경로에 해당하는 각각의 광섬유를 분광기 (Czerny Turner type, $f/\# 3$)의 입구 슬릿에 연결하였다. 분광기 입구 슬릿은 세로 15 mm 가로 0.01 mm이며, 평형 홀로그래픽 그레이팅 ($1,200\text{ grooves mm}^{-1}$; balzad at 330 nm)을 탑재하고 있다. 그레이팅은 삼입형 탈착방식을 사용하여 단위길이당 수평으로 새겨진 다양한 흡수의 그레이팅으로 교체할 수 있어, 파장영역 및 분해능을 선택할 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 광섬유 1과 2를 통하여 전송한 광신호는 분광기 collimating 반사경의 상부 및 하부에 각각 조사가 이루어진다. 이들 광신호는 평형광이 되어 그레이팅에 의해 파장별로 분해된다. Toroidal 타입으로 수면 수차와 이미지의 수차를 최적화 시킨 오목반사경에 의해 빛은 열전기적으로 냉각된 $26.6 \times$

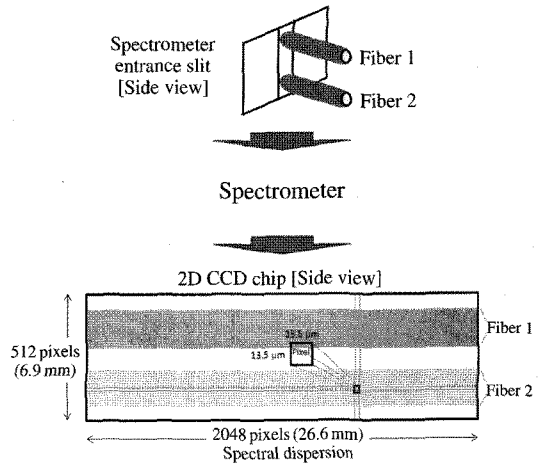


Fig. 2. Schematic diagram of light paths between optical fibers and a 2D charge coupled device (CCD) detector in a Concurrent Multi Path DOAS (CMP-DOAS) system.

6.9 mm 크기의 이차원 CCD 칩 (Jobin Yvon Symphony CCD, 2048×512 pixels, a single pixel size = $13.5\text{ }\mu\text{m} \times 13.5\text{ }\mu\text{m}$)에 집광된다. 일반적으로 이산화황, 포름알데히드 등 다수의 기체가 UV영역에서 흡수특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 가스들을 효과적으로 측정하기 위해, 350 nm에서 광양자 효율이 약 60% 이상인 back-illuminated 형식의 CCD를 사용하여 CCD 칩의 노출시간을 줄일 수 있었다. 관측 파장범위는 307~416 nm로 하여 이산화질소의 흡수파장영역뿐 아니라 후속연구를 위해 포름알데히드와 이산화황의 흡수파장영역을 포함시켰다. 파장분해능 (full width half maximum 기준)은 CCD의 가운데 지점에 대하여 최적화 되었으며, 360 nm에서 0.4 nm의 파장 분해능을 가진다. 광섬유의 상하부를 통해 전송되어 CCD 칩 상하부에 각각 집광한 광신호의 상호 간섭을 피하기 위해, 그림 2와 같이 CCD 칩에 광신호를 분리 조사할 수 있도록 분광기 입구 슬릿에서 두 광섬유 사이에 충분한 간격을 두었다.

3. 관 측

3.1 관측지점 묘사

그림 3은 성능평가를 위한 야외관측 캠페인 기간

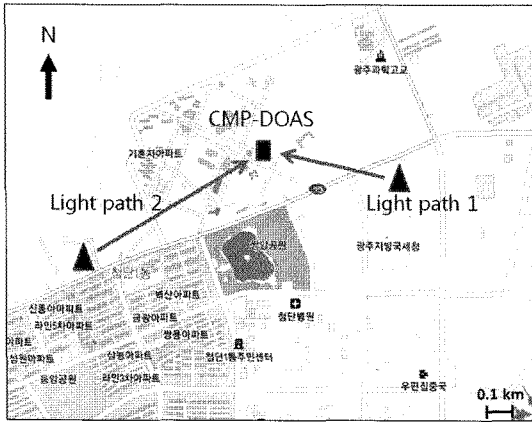


Fig. 3. Locations of CMP-DOAS setup. The instrument was installed on the rooftop of the APRI building on the campus of Gwangju Institute of Science and Technology (GIST). Triangles indicate the locations of retro-reflectors. Arrows indicate the directions of light propagations.

동안 CMP-DOAS와 두 광원과의 위치를 묘사하고 있다. CMP-DOAS를 이용한 대기 중 이산화질소 농도측정을 위해 광주광역시 시내로부터 북쪽에 위치한 광주과학기술원 고등광기술연구소 (35.13°N, 126.50°E) 옥상에 시스템을 설치하였다. 두 광원은 그림 3에 묘사한 바와 같이 광주과학기술원 정문 앞 도로를 부분적으로 가로질러 수신시스템으로부터 서쪽과 동남쪽에 각각 0.57 km (광경로 1)와 0.96 km (광경로 2) 떨어진 곳에 배치 시켰다. 시스템은 지상에서 15 m 그리고 광경로 (1)과 (2)에 해당하는 광원은 지상으로부터 각각 6 m와 8 m 고도에 배치하였다. 관측지역의 북쪽은 교통량이 비교적 작은 도로 및 논과 밭들이 위치한다. 관측지역의 남쪽은 주거 및 소규모 상업지역이 위치한다. 관측지역에서 이산화질소의 주요 발생원은 광경로들이 가로지르는 도로 상의 가솔린 및 디젤 자동차들로 예상할 수 있다.

2009년 1월 1일부터 30일까지 30일 동안 CMP-DOAS를 이용한 두 광경로에서 이산화질소의 평균 농도를 한 시간 간격으로 연속적으로 관측 하였다. 관측순서는 램프시그널을 받은 후 램프를 끄고 동일한 노출시간으로 대기 배경시그널을 측정하였다. 또한 관측 전 후에 대기 중 광경로를 통과하지 않은 Xenon 램프를 시스템 가까이에서 측정하였다. 수은 램프를 관측하여 관측한 수은 시그널을 스펙트럼 분

석시 파장과 픽셀 매핑에 사용하였다. 관측기간 동안 분광기는 분광기 벤치에 설치한 Peltier 냉각기를 이용하여 상온 15 ± 0.5°C에서 일정하게 유지하였다. 이를 통해, 외부온도 변화에 의한 분광기 및 기타 광학계의 틀림 현상을 최소화하여 파장왜곡 현상을 줄였다. 관측기간 동안 CCD 칩은 3단계 Peltier 냉각기로 -70°C를 유지함으로써 CCD에서 발생하는 암전류를 최소화하였다.

CMP-DOAS로 관측한 결과의 검증을 위하여 화학발광형 이산화질소 실시간 모니터링 장비(ECOTECH, EC9841A)를 광원들과 동일한 장소에 배치시켜 관측하였다. 사용한 화학발광형 이산화질소 모니터링 장비는 0.5 ppbv의 검출한계를 가진다. 0~20 ppmv의 이산화질소 혼합비 범위 안에서 0.5 ppbv의 정확성을 가진다.

3. 2 차등흡수분광 분석

차등흡수분광기술(Platt and Stutz, 2008)과 분석방법을 근거하여 WinDOAS (Van Roozendael and Fayt, 2001)를 이용하여 Xenon 램프로 측정된 스펙트럼을 분석하였다. 수은램프로 측정된 스펙트럼을 이용하여 세로축의 파장정보를 지닌 2,048개의 픽셀을 파장정보로 변환하였다. 암전류와 영점보정 및 대기 중 원하지 않는 경로로 들어온 빛의 영향을 제거하기 위해 관측한 스펙트럼에서 배경스펙트럼을 빼주었다. 또한 측정된 스펙트럼에서 Xenon 램프의 고유 시그널을 제거해 주기 위해, 관측 직후에 측정된 Xenon 램프 시그널을 빼주었다. Xenon 램프 시그널과 암전류 등 다양한 간섭영향을 제거한 스펙트럼은 로그를 취한 후 대기분자와 에어로솔에 의한 Rayleigh 및 Mie 산란에 의한 영향을 제거해 주었다. 이를 수행하기 위해 수치적으로 파장에 대한 빠른 변화특성 신호만을 통과시키는 필터링 (high pass filtering)을 하였다. 또한 불필요한 노이즈를 제거하기 위해 파장에 대한 느린 변화특성 신호만을 통과시키는 필터링 (low pass filtering)을 실행하였다. 최종 처리한 스펙트럼에서 농도를 구하기 위해 기준 이산화질소 스펙트럼 (Vandaele *et al.*, 1994)을 수은램프 시그널에서 생성한 기함수 및 파장정보를 컨볼루션 (convolution) 시킨 후 최종 처리한 스펙트럼과 최소자승법으로 분석을 하였다. 분석 파장영역은 이산화질소 외에 다른 가스 흡수 영향이 없는 399~415 nm로 선택하였다. 그림

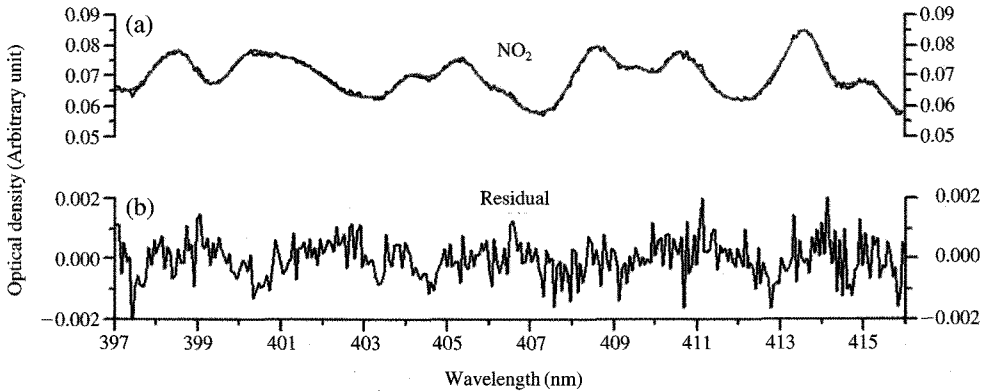


Fig. 4. An example of NO₂ optical density and residual measured by the spectra measured by CMP-DOAS. Red line (a) indicates the observed NO₂ optical density. Black line in (a) indicates the NO₂ optical density summed with the residual signal shown in (b).

4는 관측기간 중 2009년 1월 13일 아침 7시에 광경로 (2)에서 관측한 스펙트럼에서 측정된 이산화질소의 광학 두께 및 피팅 후 남은 신호를 보여준다. 측정된 광학두께의 양은 이산화질소 한 분자의 흡수단면적에 선형적으로 비례하므로 추가적인 검정 없이 농도환산이 가능하다.

3.3 정밀도 및 최소 검출 한계

시스템의 정밀도를 산출하기 위해, 499.9 ppbv의 이산화질소를 채운 10 cm 지름의 셀로 20회 연속 측정 하였다. 정밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{정밀도} = \frac{\text{표준편차}}{\text{샘플평균값}} \times 100$$

샘플의 평균값 (1.23×10^{14} molecules cm^{-2})을 셀 지름(10 cm)으로 나눈 후, 혼합비를 환산하면, 499.6 ppbv에 해당한다. 표준편차는 1.1×10^{12} molecules cm^{-2} (혼합비로 4.1 ppbv)가 되며, 정밀도 $\pm 0.82\%$ 에 해당한다. 야외에서의 최소검출한계를 구하기 위해서는, 실제 광경로인 0.5 km 혹은 1 km에서 특정농도의 이산화질소를 지속적으로 유지하면서 연속측정을 할 수 있어야 한다. 그러나 현실적으로 이와 같은 조건을 유지하기는 어려움이 있으므로, 측정된 최대오차를 이용하여 최소검출한계를 대략적으로 산출할 수 있었다. 관측기간 동안 측정된 최대 오차는 1.2×10^{15} molecules cm^{-2} 이었으며 약 1 km의 광경로(2)의

경우에서 이는 0.48 ppbv에 해당한다. 관측기간 동안 실제 야외관측에서 이산화질소의 최소검출한계가 약 0.5 ppbv 이상임을 알 수 있었다. 정확도는 그림 4에 제시한 바와 같이 차등흡수분광 분석 후 남은 스펙트럼을 이용하여 측정 오차를 구할 수 있다. 최대 측정 오차를 해당 측정값으로 나눈 비를 백분율로 표현하여 구할 수 있다(Stutz and Platt, 1996). 본 연구에서 최대 측정 오차를 고려하여 계산할 경우 정확도는 $\pm 1\%$ 수준임을 알 수 있다.

4. 관측 결과

그림 5는 CMP-DOAS 및 이산화질소 화학발광법에 의한 지점모니터링 장비로 측정된 이산화질소의 시간에 따른 농도변화를 보여주고 있다. 그림 5(a)는 관측기간 중 광경로 (1)에서 측정된 이산화질소의 농도를 보여주고 있다. 같은 그림에서 (b)는 광경로 (2)에서 측정된 이산화질소의 농도를 나타내고 있다. 관측기간 동안 광경로 (1)의 지점 모니터링에서 측정된 이산화질소의 혼합비는 3.7~168.4 ppbv였으며, CMP-DOAS로 측정된 이산화질소의 범위는 8.2~147.9 ppbv로 지점모니터링이 CMP-DOAS 광경로 (1)의 측정값 보다 좀 더 넓은 혼합비 범위를 보였다. 지점모니터링 (1) 및 CMP-DOAS 광경로 (1)의 이산화질소 평균값은 각각 61.4와 54.9 ppb로 광경로(1)

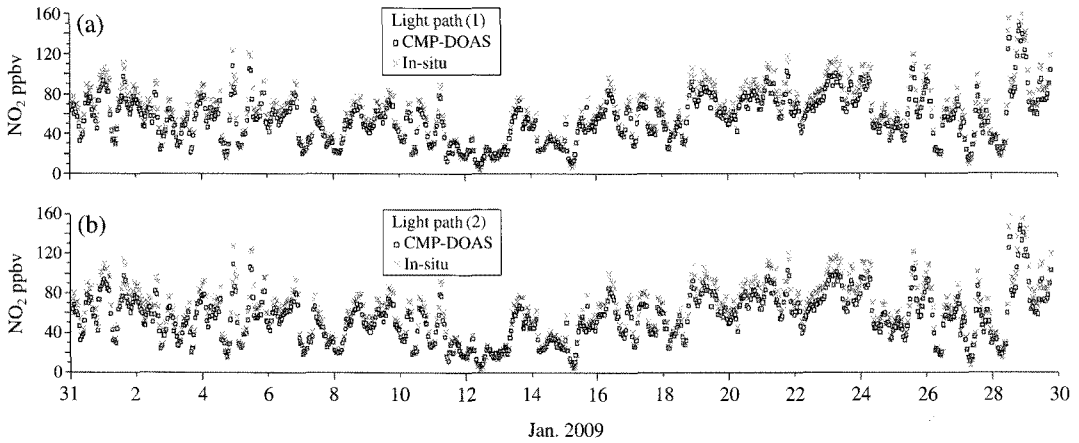


Fig. 5. Time series of NO₂ mixing ratio measured by a CMP-DOAS and a chemiluminescence NO₂ in-situ analyzer: (a) and (b) denote the light paths (1) and (2), respectively.

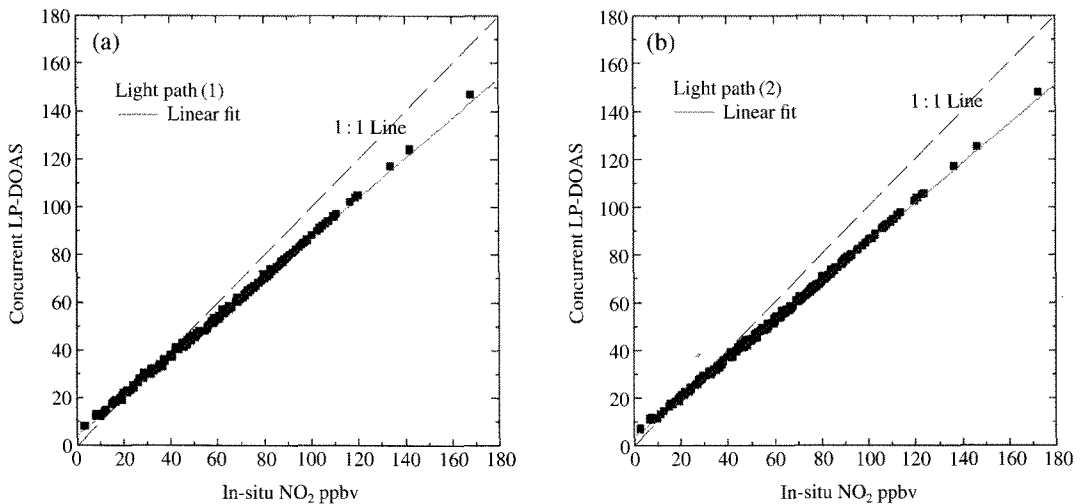


Fig. 6. Correlations between NO₂ mixing ratios measured by a CMP-DOAS system and a chemiluminescence in-situ monitor for the entire measurement period. (a) for the light path (1) and (b) for the light path (2).

보다 지점모니터링의 위치가 도로에서 배출하는 이산화질소의 영향을 보다 많이 받는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 지점모니터링 값에서 최소 혼합비를 관측한 것은 관측 당시의 국지적인 풍향의 영향을 받은 것으로 해석된다. 그림 5(b)에서 CMP-DOAS 광경로 (2)와 지점모니터링 (2)에서 측정된 이산화질소의 범위는 각각 6.9~147.8 ppbv와 3.1~172.9 ppbv로 광경로 (2)의 경우도 광경로 (1)과 거의 유사한 혼합

비 변화를 보여주고 있다.

그림 6에서는 지점 모니터링으로 측정된 이산화질소와 CMP-DOAS로 측정된 광경로 (1)과 (2)에서 측정된 값들 사이의 관계를 보여주고 있다. 두 경우 모두 광경로에서 측정된 값과 지점에서 측정된 값들의 높은 상관관계를 보여주고 있다. 자동차로 인한 이산화질소 배출원이 있는 도로에 가까운 지점 모니터링에서 측정된 이산화질소의 농도가 조금 더 높은 것을 보

여주었다. 그리고 농도가 높을수록 거의 CMP-DOAS로 측정된 이산화질소의 혼합비가 선형적으로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 도로에서부터 상대적으로 저농도 지역인 CMP-DOAS시스템이 있는 위치까지 이산화질소의 농도가 선형적으로 감소하는 현상을 간접적으로 보여주는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구는 이차원 CCD 검출기를 LP(Long Path)-DOAS 기술에 적용한 것에 해당한다. 따라서 선행연구들(Lee et al., 2008; Dunlea et al., 2007; Thornton et al., 2003; Kim and kim et al., 2001)에서 논의한 바와 같이 화학발광법으로 측정된 이산화질소 농도의 비교시 고려해야 할 점들이 있다. 화학발광법에 의한 지점 측정의 경우는 일정 유량으로 시료를 주입하면서 이산화질소 농도를 측정하는 것에 해당한다. 반면 DOAS 측정결과는 경로상으로 이동하는 이산화질소의 선농도를 관측하는 것에 해당한다. 시스템 및 지점 모니터링 장비의 설치 높이는 15m인데 반해 광원설치 높이는 6m와 8m로 차이가 있다. 따라서 두 모니터링 장비로 측정된 결과를 1:1로 비교 시 차이가 존재할 수 있다. 또한, 지점 모니터링 장비로 관측한 부피농도의 경우, 근접한 위치의 영향을 더 많이 받지만 DOAS의 농도는 기류의 영향(이류나 확산 등)을 받는다. 이러한 차이에도 불구하고, 그림 5와 6에서 보듯이 지점 측정값과 DOAS 측정값의 경향이 매우 일치하고, 상관성이 높게 나타난다. 이러한 결과는 본 연구가 비교적 짧은 경로에서 비교실험이 진행하였으며, 관측지역의 배출원 특성이 유사한 것이 가장 큰 이유로 볼 수 있다. 그림 5와 6에서 경로 1과 2의 경우 DOAS결과에 비해 상대적으로 대칭성을 보인다. 특히 지점측정치들 높인 이유는 화학발광법으로 측정된 이산화질소는 NO_x , 특히 HNO_3 와 PAN에 의한 간섭으로 이산화질소를 과대평가하는 경향을 고려한 것으로 본다.

본 연구에서는 화학발광법과의 비교연구를 수행하였으며, 두 측정 결과 사이에 매우 높은 일치도를 확인할 수 있었다. 그러나, 측정결과와 보다 정확한 상대적 불확실성을 정량적으로 파악하기 위해서는 기존의 LP-DOAS장비로 측정된 값들의 비교연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 이산화질소뿐만 아니라 오존이나 이산화황 등 다양한 가스물질들에 대한 측정 및 성능평가 연구의 수행을 통해, CMP-DOAS의 실용화 가능성을 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 CMP-DOAS를 처음으로 개발하고 현장분석에 응용한 첫 연구사례를 소개하고자 두 개의 광경로에서 동시에 이산화질소의 혼합비를 측정할 예를 제시하였다. 한달 동안의 테스트 기간 동안, 지점 모니터링과의 비교점중에서 이산화질소의 경시적 변화 경향이 높은 상관관계를 유지한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 감안할 때 CMP-DOAS는 한 대의 광수신시스템을 사용하여 비교적 낮은 비용으로 다경로에 존재하는 미량기체들의 동시 측정에 유용하게 적용 가능하다는 것을 확인하였다. 추가적으로, 수신광학계를 더욱 정밀하게 설계함으로써, 수십 개의 경로에서 동시측정이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 차등흡수분광법을 이용하여 광역대의 파장영역을 조사한다면, 보다 다양한 가스상물질들을 다경로에서 실시간 동시 측정하는 것이 가능할 것이다. 관련 연구를 지속적으로 수행한다면 다양한 산업지역, 발전소, 주거지역, 광역도시 등에서 대기오염물질들을 효과적으로 감시 및 관리할 수 있는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다. 논문 수정에 있어서 많은 관심과 충고를 해주신 심사위원 분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Choi, S.C., Y.J. Kim, D.H. Kim, and J. Lee (2004) A Differential Absorption Lidar (DIAL) for ozone measurements in the planetary boundary layer in an urban area, J. Korean Phys. Soc., 1432-1437.
- Dunlea, E.J., S.C. Herndon, D.D. Nelson, R.M. Volkamer, F. San Martini, P.M. Sheehy, M.S. Zahniser, J.H. Shorter, J.C. Wormhoudt, B.K. Lamb, E.J. Allwine, J.S. Gaffney, N.A. Marley, M. Grutter, C. Marquez, S. Blanco, B. Cardenas, A. Retama, C.R. Ramos Villegas, C.E. Kolb, L.T. Molina, and M.J. Molina (2007) Evaluation of nitrogen dioxide chemilu-

- minescence monitors in a polluted urban environment, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2691-2704.
- Kim, K.H. and M.Y. Kim (2001) Comparison of an open path differential optical absorption spectroscopy system and a conventional in situ monitoring system on the basis of long-term measurements of SO₂, NO₂, and O₃, *Atmos. Environ.*, 35, 4059-4072.
- Lee, C., S.B. Hong, H. Lee, J.S. Jung, Y.J. Choi, J.E. Park, Y.J. Kim, K.H. Kim, J.H. Lee, K.J. Chun, and H.H. Kim (2005a) Measurement of atmospheric formaldehyde and monoaromatic hydrocarbons using differential optical absorption spectroscopy during winter and summer intensive periods in Seoul, Korea, *Water Air Soil Pollut.*, 165(1-4), 171-185.
- Lee, C., Y.J. Choi, J.S. Lee, J.S. Jung, Y.J. Kim, and K.H. Kim (2005b) Measurement of atmospheric BTX in Seoul using differential optical absorption spectroscopy, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S., Y.J. Kim, B. Kuk, A. Geyer, and U. Platt (2005c) Simultaneous measurement of atmospheric pollution and visibility with a long-path DOAS system in urban areas, *Environ Monit Assess.*, 104, 281-293.
- Lee, J., K.H. Kim, Y.J. Kim, and J. Lee (2008) Application of a long-path differential optical absorption spectrometer (LP-DOAS) on the measurements of NO₂, SO₂, O₃, and HNO₂ in Gwangju, Korea, *J. Environ. Manage.*, 86, 750-759.
- Leigh, R.J., G.K. Corlett, U. Friess, and P.S. Monks (2006) Concurrent multi-axis differential optical absorption spectroscopy system for the measurement of tropospheric nitrogen dioxide, *Appl. Opt.*, 45(28), 7504-7518.
- Leigh, R.J., G.K. Corlett, U. Friess, and P.S. Monks (2007) Spatially resolved measurements of nitrogen dioxide in an urban environment using concurrent multi-axis differential optical absorption spectroscopy, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4751-4762.
- Platt, U. and J. Stutz (2008) *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*, Springer Verlag, Heidelberg.
- Stutz, J. and U. Platt (1996) Numerical analysis and error estimation of differential optical absorption spectroscopy measurements with least squares methods, *Appl. Opt.*, 35, 6041-6053.
- Thornton, J.A., P.J. Wooldridge, R.C. Cohen, E.J. Williams, D. Hereid, F.C. Fehsenfeld, J. Stutz, and B. Alicke (2003) Comparisons of in situ and long path measurements of NO₂ in urban plumes, *J. Geophys. Res.*, 108(D16), 4496, doi:10.1029/2003JD003559.
- Van Roozendaal, M. and C. Fayt (2001) *WinDOAS 2.1 Software User Manual*, Inst. d'Aeron, Spatiale de Belg./ Belg., Inst. voor Ruimte-Aeron., Uccle.
- Vandaele, A.C., T.C. Simon, J.M. Goilmont, C.M. Carleer, and R. Colin (1994) NO₂ absorption cross section measurement in the UV using Fourier transform spectrometer, *J. Geophys. Res.*, 99, 25599-25605.