

간섭계를 이용한 차량 기반 에어로졸 광흡수 측정 연구

이 정 훈^{*†}

* 한국기술교육대학교 기계정보공학부

Study of Aerosol Light Absorption Measurement Operated in a Vehicle Using an Interferometer

Jeonghoon Lee^{*†}

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Tech. & Edu.

(Received June 27, 2011; Revised August 17, 2011; Accepted August 22, 2011)

Key Words : Aerosol Absorption(에어로졸 흡수), Nigrosin(나이그로신), Absorption Cross Section(흡수단면적)

초록: 대기중에 부유하고 있는 입자들의 광흡수량을 측정할 수 있는 기법을 소개한다. 본 연구에서 사용된 기법은 광열분광법이다. 광흡수 측정에 있어서 광열 기법의 장점은 광산란에 둔감할 뿐만 아니라 광산란 계수의 영향을 받지 않고 광흡수 계수를 직접적으로 측정할 수 있다는 것이다. 공기중 부유물질의 흡수 계수 측정의 시간 상수는 10 초이며, 실시간으로 고속도로 주변에서 흡수 계수를 측정하였다. 자동차 경주용 트랙, 공항, 또는 연구소 정문 등 차량 통행량이 많은 지역에서의 흡수 계수가 높게 측정되었는데, 이는 카본 부유물 입자에 의한 영향이라고 판단된다.

Abstract: We propose a method operated in a vehicle to measure light absorption of particles in atmosphere. The advantage of this method is that it is insensitive to light scattering and hence can be used for the direct measurement of the light absorption coefficient without suffering from light scattering. With this method atmospheric light absorption can be measured at a time constant of 10 s. Further, our method allows for the real-time measurement of light absorption near a highway. The light absorption coefficients were high near a race track, an airport and the main gate where vehicles emitted carbonaceous particles.

1. 서 론

기후 변화에 관한 다정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)이 발표한 보고서에 의하면 인류에 의해 인위적으로 생성된 물질들 중에서 이산화탄소, 메탄, 오존, 블랙카본 등은 $+0.07\sim 1.66 \text{ W/m}^2$ 에 해당하는 양(+)의 복사강제력을 나타내는 반면, 전체 대기 에어로졸은 직접 효과(Direct effect) 및 구름 알비도(Cloud albedo)에 의한 간접 효과(Indirect effect)를 통해 $-0.7\sim -0.5 \text{ W/m}^2$ 에 해당하는 음(-)의 복사강제력을 나타낸다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 한편, 인류에 의한 인위적인 생성물이 아닌 태양광에 의한 복사강제력

은 단지 0.12 W/m^2 에 지나지 않는다고 알려져 있다. 인류에 의해 인위적으로 생성된 물질들에 의한 전체 복사강제력은 $+1.6 \text{ W/m}^2$ 로 나타난다. IPCC 보고서가 주목하는 것은 인류에 의한 인위적 생성물이 양의 복사강제력을 나타낸다는 사실뿐만이 아니다. 보고서는 인위적 생성물 중에서 이산화탄소, 메탄 등의 물리, 화학적 성질에 대한 과학적 이해도는 이미 높은 수준에 이르렀지만 블랙카본 및 에어로졸에 대한 과학적 이해는 아직 낮은 단계에 머물러 있다는 사실도 지적하고 있다. 또한, 이산화탄소, 메탄, 오존 등의 온실 가스(GHG, Green House Gases, GHG)에 의한 복사강제력은 그 불확실성이 높지 않지만 에어로졸에 의한 복사강제력의 불확실성은 매우 높다. 따라서 인위적으로 생성된 물질에 의한 전체 복사강제력의 불확실성은 에어로졸에 의한 복사강제력의 불확실성에 의해 지배를 받게 된다. 과도한 불확실성은 기후 변

† Corresponding Author, jlee@kut.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

화에 대한 응답의 미래 예측에도 존재하는데 이로 인해 미래에는 서로 다른 방식으로 대응해야 할 필요성이 있다.⁽²⁾ 따라서 에어로졸과 블랙카본에 대한 광학적 특성을 연구할 필요가 있으며 특히 대기중 실시간 측정으로 얻어진 데이터들은 에어로졸에 의한 복사강제력을 예측하는 기초 데이터로 활용되고 있어 중요한 의미를 지니고 있다. 이를 위해 정밀도가 향상된 에어로졸 광흡수 측정 장치를 개발하고 나아가 고속도로 상에서의 로드 테스트를 통해 에어로졸 흡수 계수 측정 장치의 안정성을 증가시키는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 에어로졸의 광흡수량을 측정하기 위하여 광열간섭법을 도입하였다. 광열간섭법의 원리는 다음과 같다. 간섭계의 기준 참조 경로에 대하여 측정 탐침 경로가 꺾게 되는 광학적 경로의 변화를 측정하는 원리를 이용한다. 기준 참조 경로가 측정 탐침 경로와 함께 광 분할기상에 모이면, 간섭 패턴이 발생한다. 만약 간섭계 탐침 경로상의 광학적 경로가 변화하면, 간섭 패턴에 있어 이동이 발생한다. 간섭 기술은 경로 변화에 민감하므로 나노미터 이하의 길이를 측정할 때 널리 사용된다.⁽³⁻⁶⁾ 이번 연구는 이렇게 민감하고 정밀한 간섭 기술을 광흡수량 측정에 적용하고자 한다. 광학적 경로의 변화는 국소적인 가열로 인하여 방사상으로 흡수된 에너지의 소산이 주위 온도 구배를 형성할 때 유도된다. 이러한 국소적인 가열이 에어로졸 입자 주위의 굴절률에 대한 구배를 발생시키고 간섭계의 탐침 경로는 간섭을 받지 않은 기준 참조 경로에 대하여 광학적 경로차를 발생시킨다. 이 효과는 마치 여름에 태양광에 의하여 가열된 아스팔트 위에서 온도 구배가 발생하고 이로 인해 광학적 경로의 경사 굴곡이 나타나는 신기루 현상과 유사한 것이라 할 수 있다.⁽⁷⁾ 이렇게 변경된 광학적 경로는 결국 광분할기 상에 형성된 간섭 패턴의 이동을 야기하고 단일 원소 검출기에 의해 신호의 강도 변화로서 검출된다. 흡수 표준 기체를 이용하여 간섭 패턴의 이동을 보정하면 에어로졸 흡수에 의한 간섭계 신호의 변화를 정량화할 수 있는 것이다. 광학적으로 광산란은 온도 구배를 형성하지 않기 때문에 굴절률 구배를 발생시키지 않는다. 그러므로 간섭계의 탐침 경로 광은 광학적 경로 변화를 겪지 않는다. 이것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 기후 변화를 연구

하는 연구 그룹들에 의하면 모든 종류의 에어로졸에 대한 광소멸 메커니즘 가운데 지배적인 것은 광산란이다. 이때 간섭계의 탐침 경로 광과 기준 참조 경로 광의 레이저 출력을 동일하게 유지하고, 신호 검출기의 반응도, 전자 하전, 신호 검출기 양자 효율, 레이저 에너지, 시간-의존 위상 변동을 고려하면 간섭계 신호는 광산란이 아닌 입자의 광흡수에 의해 형성된 위상 변동에 선형적으로 의존하게 된다. 광열간섭계에 장착된 단일 원소 검출기는 직각위상 위치에서 신호를 모니터링 하기 때문에 간섭계의 기준 경로광과 탐침 경로광간의 상대적 경로 변화는 항상 간섭 패턴의 이동을 야기하게 된다. 이러한 간섭패턴의 이동을 유발하는 메커니즘은 광흡수 또는 광학 부품들의 기계적 진동이라 할 수 있다. 위상-민감 감지 기법은 감지 신호 폭을 좁히는 데 사용되는데 원하지 않는 진동은 여전히 노이즈를 발생시키고 전체적인 민감도를 줄인다는 단점이 있다. 따라서 진동에 대한 민감도를 제거하기 위한 조치를 취했다. 간섭계를 지지하고 있는 광학대를 부유시키거나 간섭계 내부를 차음재 및 흡음재로 차단하였다. 실험실 밖에서의 실험을 위해서 기계적 진동에 둔감한 시스템을 탐색하였다. 여러 참고문헌에서 나타나듯이⁽⁸⁻¹⁰⁾ 접이형 Jamin 간섭계의 광학적 설계가 기계적 진동에 강건한 경향을 보인다는 사실을 알아냈다. 접이형 Jamin 광학계 구성을 이용해 광흡수를 측정하였다. 광열간섭계 실험 장치는 Fig. 1에 나타난 장치 개략도와 같이 간섭 패턴 형성을 위한 헬륨-네온 이온 레이저, 접이형 Jamin 광학계 형성을 위한 Jamin 헤드 및 되돌림-반사기로 구성되어 있다. 파장이 632 nm 인 적색의 헬륨-네온 이온 레이저 광은 Jamin head 내의 에탈론 슬릿에서 50%의 광은 되돌림-반사기를 향해 투과하여 외측 탐침 경로 광을 구성하고 나머지 50%의 광은 에탈론 슬릿에서 1 회 반사한 이후에 되돌림-반사기를 향해 내측 기준 참조 경로 광을 형성하여 접이형 Jamin 간섭계 구성을 완성한다. 피에조 액추에이터 제어 를 이용해, 간섭계의 탐침 경로 광과 기준 참조 광의 위상 조건이 항상 직각위상이 유지되도록 자

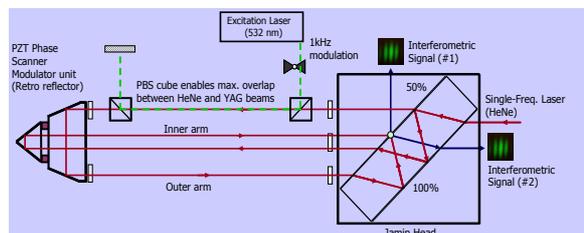


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

동으로 전압을 제어한다. 이때 파장이 532 nm 인 녹색의 야그 레이저 광은 편광 광 분할기에 의하여 탐침 경로에 조사되어 에어로졸을 가열한다. 야그 레이저에 의해 에어로졸 주위의 공기가 가열 되면 탐침 경로 광 주위의 굴절률이 변하게 되고 굴절률이 변화하면 탐침 경로의 광학적 경로에 차이가 발생하여 위상 이동이 발생하며 이동된 크기가 에어로졸 흡수에 정비례 한다는 원리를 이용한다^(7, 11-15). 구성된 접이형 Jamin 간섭계는 알루미늄 재질의 박판으로 외부와 차단이 되어 있으며, 실험 장치의 부피는 70 x 50 x 50 cm³에 지나지 않아 차량이나 항공기에 쉽게 설치가 가능하여 실시간 이동 측정이 가능하다. 장치의 바닥면 네 모서리에 진동 흡수용 댐퍼를 설치하여 차량에서 발생하는 진동이 접이형 Jamin 광열간섭계로 이동하는 것을 극소화하였다.

광열간섭계 내부에 에어로졸이 주입되는 부분인 샘플 셀(Sample cell) 내에서의 유동은 층류 유동이 되어야 한다. 이차원 정상 상태의 수치해석을 이용하여 샘플 셀 내부 유동을 계산하였고 계산 결과를 Fig. 2 에 제시하였다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 중앙 주입구를 통하여 0.3 lpm 의 유량으로 에어로졸을 주입하였을 경우 샘플 셀 내부의 속도는 대략 0.002 m/sec 로 거의 일정한 층류 유동임을 확인할 수 있다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 간섭계 보정

광열 신호는 위상-민감 감지 기법을 사용해서 측정하였다. 이때 파장이 532 nm 에서 작동되는 레이저는 기계적 초표에 의해 직사각형 형태의 파형으로 변조되었다. 변조된 광열 신호는 노이즈 제거를 위해 락인 미소신호증폭기(Lock-in amplifier)와 예비증폭기(Pre-amplifier)를 조합한 시스템에 GPIB(General Purpose Interface Bus)를 이용해 컴퓨터로 전송되었다. 시간 상수는 10 초~30 초로 설정하였다. 보정 실험은 이산화 질소를 광열간섭계 내부의 샘플 셀 안으로 주입할 때 변화하는 신호를 이산화 질소 농도의 함수로 측정함으로써 수행되었다. 이산화 질소의 농도는 질량 유량 제어기를 사용하여 표준 건조 질소를 혼합하는 방법으로 제어하였다. 간섭계의 내부에 설치된 프리즘에 오염 물질이 부착되지 않도록 건조한 질소 기체를 프리즘 표면에 분사하였다. 하지만, 프리즘 표면에서의 오염물질에 의한 부가적인 열발생을 원천적

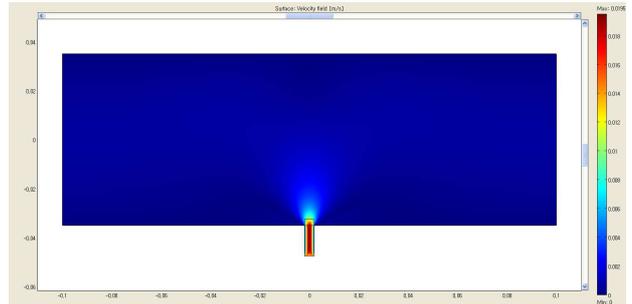


Fig. 2 Flow pattern inside the sample cell with the help of 2-D numerical simulation

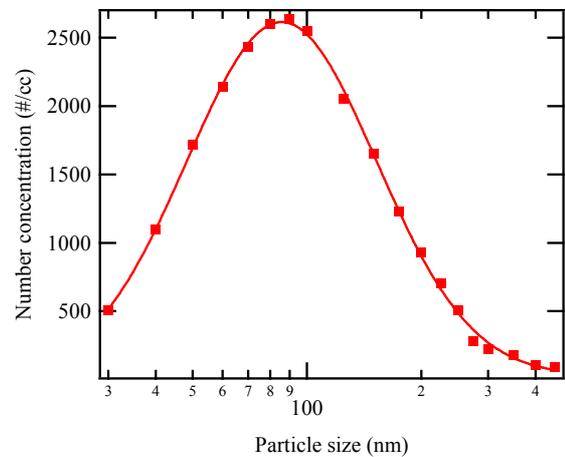


Fig. 3 Size distribution of nigrosin particle aerosol

으로 방지하기 위하여 정기적으로 메탄올을 이용하여 청소하였다. 본 연구에서는 레이저광과 간섭계의 탐침 경로 광이 겹치는 정규 경로 길이는 5 cm 로 유지하였다.

3.2 실험실 기반 측정

박테리아 연구의 네거티브 염색에 사용되는 폴리안일린(Polyaniline) 기반의 흑색 잉크 염료인 나이그로신(Nigrosin) 에어로졸을 발생시켰다. 나이그로신은 블랙카본을 대신해서 사용되었다. 아토마이저를 이용하면 쉽게 광흡수 에어로졸을 발생시킬 수 있다. 기존 연구에 의하면 아토마이저에 의해 발생된 나이그로신 에어로졸의 형상은 구형이었다.⁽¹⁶⁾ 또한, 가시광선 영역에서 광대역 흡수 스펙트럼을 지니고 있어 블랙 카본 대용물질로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 상용화된 아토마이저를 이용하여 나이그로신 수용액을 분무화/미립화하였다. 나이그로신의 농도는 1 mg/cm³ 으로 유지하였다. 아토마이저에서 발생된 나이그로신 입자들은 구슬 직경 2~5 mm 의 건조 실리카겔이 들어 있는 확산 건조기를 통과하여 건조되었다. 아토마

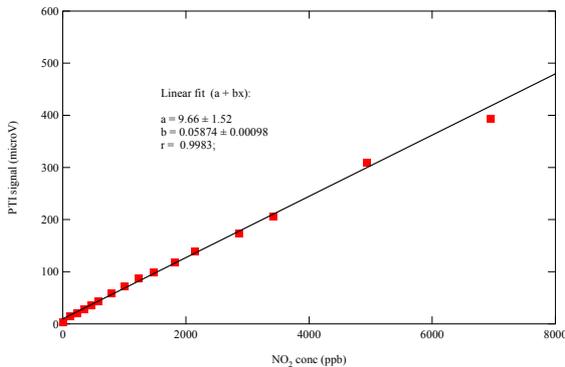


Fig. 4 Calibration curve for nitrogen dioxide

이제에서 발생된 나이그로신 입자는 Fig. 3 에 제시된 바와 같이 평균 직경이 85.3 nm 인 로그정규 분포의 크기 분포를 갖는다. TSI 사의 장형 차분모빌리티분석기(Long Differential Mobility Analyzer), 임팩터와 응축핵 계수기(Condensation Particle Counter)로 구성된 정전 분급기는 나이그로신 에어로졸을 광열간섭계로 주입시키기 전에 입자 크기 분포 측정하는데 사용하게 되었다. 부수적으로 에어로졸 출입구 사이의 내재적인 입자 손실 보정을 위해 측정 장치 전 후의 입자 수 농도를 측정하였다. 이 과정은 나이그로신 에어로졸의 크기와 그에 대한 수농도 측정에 대해 여러 차례 반복되었다. 입구 유량은 분당 0.5~1.5 리터로 유지하였다. 입구 유량이 결정된 후 그 해당 유량은 일정하게 유지하였다.

광열간섭법은 통상적으로 사용되는 추적가능 표준 기체를 이용하여 보정할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 표준 인증 획득한 이산화 질소를 사용하였다. 이산화 질소의 광흡수 단면적은 파장이 514 nm 일 때, $1.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ 이라고 알려져 있다.^(10,17~20) 광흡수 단면적과 보정 곡선을 이용하면 광열간섭계 응답 신호를 흡수 계수(Mm^{-1})로 쉽게 변환할 수 있다. 광열 간섭계 응답 신호 곡선의 기울기는 표준편차가 $0.04 \mu\text{V}/\text{Mm}^{-1}$ 이고 평균값은 $1.45 \mu\text{V}/\text{Mm}^{-1}$ 으로 측정되었다. 이론에서 예상할 수 있듯이 본 실험에서 사용된 이산화 질소의 농도를 9 ppb 에서 9000 ppb 까지 광범위한 구간에서 변화시킨 결과 광열간섭계의 신호는 선형적으로 측정되었다(Fig. 4). 표준 보정 기체를 사용하는 또 다른 장점은 에어로졸을 발생시킬 필요가 없이 실험 장치의 성능을 평가할 수 있다는 것이다. 즉 정상 크기 분포에 대하여 정상 상태의 농도 유지가 가능하다는 의미이다. 최소오차승법을 이용하여 표준편차가 주어진 보정 기울기를 구

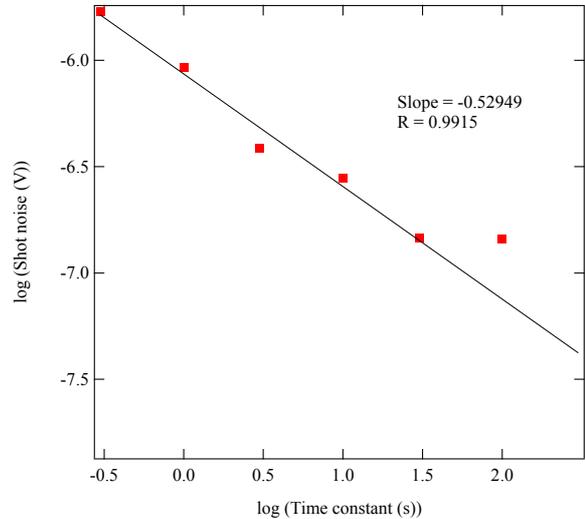


Fig. 5 Shot noise as a function of time constant

할 수 있다. 이렇게 구해진 기울기로부터 95% 신뢰구간에서의 정확도(accuracy)는 5%였다. 표준편차의 두 배에 해당하는 값으로 정의되는 광열간섭계의 정밀도(precision)는 198 ppb 의 이산화 질소를 주입하였을 때 측정되는 신호로부터 구해진 표준편차로부터 구할 수 있었고 그 값은 시간상수가 10 초일 때 0.16 Mm^{-1} 로 측정되었다. 광열간섭계 신호가 산탄 잡음(shot noise)에 의해 지배받다고 가정하고 Owens 등⁽²¹⁾에 의해 보고된 논문에 의하면 암모니아에 대하여 시간상수가 1 초일 때 정밀도는 1.4 Mm^{-1} 였는데 이는 시간상수가 10 초일 때로 환산하면 0.44 Mm^{-1} 임을 의미한다. 이것은 접이형 Jamin 구성의 성능이 향상되었다는 것을 의미한다. 독자들은 두 개의 에탈론이 사용된 수정된 Jamin 구성이 Owens 등⁽²¹⁾에 의해 사용되었다는 것에 유의해야 한다. 한편 파장이 9.22 마이크로미터의 암모니아에 대한 흡수 단면적은 파장이 514 nm 일 때의 이산화 질소의 흡수단면적보다 대략 10 배 크다는 점에 유의해야 한다. ($\sigma_{\text{abs}}(\text{ammonia}) = 2.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{molecule} @ 9.22 \text{ microns}$ ⁽²²⁾). 마지막으로 접이형 Jamin 광열간섭계의 측정 한계는 시간상수가 10 초일 때, 0.35 Mm^{-1} 로 추산되었다. 대기 에어로졸 측정을 위해서 대기 에어로졸의 일반적인 흡수 계수 범위 내에서 실험을 수행하였다. 일반적으로 대기 에어로졸의 흡수 계수는 0-50 Mm^{-1} 로 알려져 있다. 이에 대응하는 입자 수농도를 실험에 사용하였다.

광열간섭법을 이용한 계측은 간섭 현상을 이용하기 때문에 민감도가 매우 우수한 장치라고 알려져 있다.⁽²³⁾ 민감도를 향상시키기 위해서는 노이즈

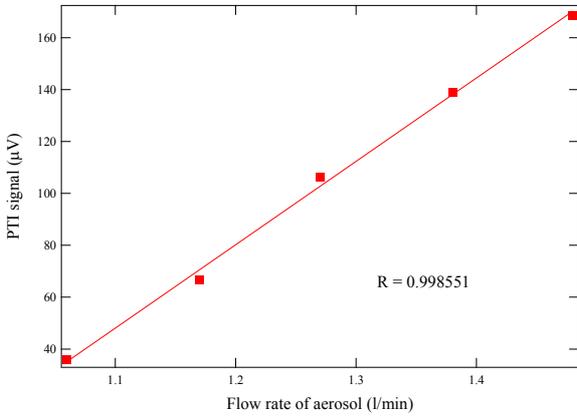


Fig. 6 Signal increases with the flow rate of nigrosin aerosol

관리가 필수적이며, 노이즈를 줄이기 위한 노력의 일환으로 PTI 장치의 노이즈 수준을 관찰하였다. Fig. 5 에 광열간섭장치에서 측정되는 산탄 잡음 (shot noise)과 시간 상수와와의 관계를 나타냈다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 산탄 잡음은 시간 상수의 -0.529 제곱에 비례함을 알 수 있다. 일반적으로 산탄 잡음이 시간 상수의 -0.5 승에 비례한다는 사실을 고려하면, 이번 실험으로부터 얻어진 산탄 잡음의 수준은 거의 -0.5 승에 유사한 값이므로 본 실험 장치의 노이즈 수준은 산탄 잡음 수준으로 내려가 있음을 의미한다.

광열간섭계의 신호는 에어로졸의 유량에 따라 정비례함을 보여주는 그래프가 바로 Fig. 6 이다. 아토마이저에서 생성된 에어로졸은 광열간섭계로 측정하기에는 수농도가 너무 높아 생성된 에어로졸을 희석시스템에 통과시킨 후 광열간섭계로 주입하였다. 희석시스템에서 에어로졸 유량을 증가시킬수록 에어로졸의 수농도가 증가함을 응축 입자 계수계(Condensation particle counter)로 확인하였다. 에어로졸에 방사상으로 흡수된 에너지의 소산은 에어로졸 주위의 온도 변화를 유발하고, 이 때 발생된 온도 변화는 굴절률 변화로 이어진다. 주위 굴절률 변화는 광 경로 차의 변화를 야기하는데 이때 발생된 광 경로차의 크기는 에어로졸에 광이 흡수한 정도에 정비례함을 분명하게 보여준다. 에어로졸의 유량을 증가시키면 샘플 셀 내부에 존재하는 에어로졸의 수농도가 증가하고 수농도의 증가는 에어로졸 광흡수로 이어진다. 따라서 에어로졸 유량의 증가에 따라 광열간섭신호가 정비례적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 7 은 나이그로신 에어로졸의 크기에 따른 광흡수 단면적을 나타낸 그래프이다. 장 차분 모

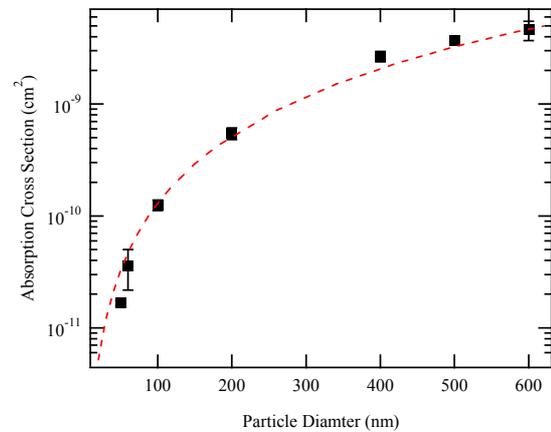


Fig. 7 Absorption cross section of nigrosin particles at various particle size

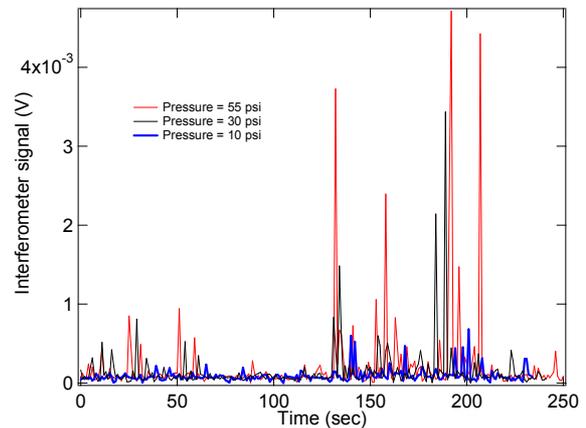


Fig. 8 Fluctuation of signals at various applied damper pressure

빌리티 분석기(Long Differential Mobility Analyzer)를 사용하여 50 nm, 60 nm, 100 nm, 200 nm, 400 nm, 600 nm 크기의 나이그로신 에어로졸을 생성하였다. 수농도를 변화시키면서 각각의 에어로졸을 광열간섭계에 주입했을 때 획득된 신호를 분석하여 나이그로신의 흡수 단면적을 측정하였다. 동일한 크기의 나이그로신 에어로졸에 대하여 수농도를 변화시키면서 광흡수계수를 측정하여 흡수 단면적을 구하였다. 각각의 크기에 따른 흡수 단면적은 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 입자 크기의 제곱에 비례하는 추세선 곡선에 근접한다. 이는 에어로졸 입자의 광흡수에 에어로졸 입자의 표면적만이 참여한다는 것을 의미하는 중요한 결과이다. 한편 50 nm, 60 nm, 100 nm 의 세 경우, 즉 100 nm 이하의 결과만을 이용하여 선형 회귀 분석을 수행하면 광흡수 단면적은 입자 크기의 제곱에 비례한다는 결과를 얻을 수 있다. 이는 광흡수 메커니즘에 있어서 입

자의 크기가 작아질수록 입자 크기의 세제곱, 즉, 체적이 에어로졸 입자의 광흡수에 관련되어 있다는 물리적 사실을 말해준다. 따라서 Fig. 7의 결과로부터 나노 입자의 광학적 특성의 물리적 메커니즘 규명도 가능하다는 사실을 확인하였다.

3.3 대기 에어로졸 측정

광열간섭계를 대기 에어로졸 샘플링 관에 연결하여 12 분간 평균한 데이터값은 시간 상수가 10 초일 때 3.7 Mm^{-1} 였고, 변동값은 3.1 Mm^{-1} 였다. 광열간섭법의 경우 굴절률 변화를 측정하기 때문에 물분자의 유입은 굴절률의 상승을 야기하고 따라서 가열에 의한 굴절률 감소에 의해 상쇄된다. 따라서 광열간섭계로 유입하기 이전에 유입관 주위를 테이프 히터로 사용하여 가열하였다. 여행용 캠핑차량인 Winnebago 에 광열간섭계를 탑재하여 일반 도로 조건과 동일하며 신호등의 영향을 받지 않는 원형 트랙을 주행하며 광열간섭계로부터 획득된 신호를 측정하였다. 광열간섭계 하부 네 곳에 진동 흡수용 댐퍼를 장착하였다. Fig. 8은 중이온 충돌 가속기 주위를 정속 조건(40 mph)으로 주행하면서 대기중 에어로졸의 흡수 계수를 측정한 결과이다. 광열간섭계로 전달되는 진동을 감소시키기 위해 진동 흡수용 댐퍼의 내부 압력을 조정하였다. 댐퍼의 내부 압력을 10 psi, 30 psi, 55 psi 로 변화시키면서 광열간섭계의 신호를 측정하였다. 댐퍼의 내부 압력이 55 psi 인 경우에는 광열간섭계의 신호가 특정 지역을 통과할 때 신호의 변동이 매우 심하였다. 댐퍼 내부의 압력을 30 psi 로 감소시켰을 때에도 마찬가지로 광열간섭 신호가 매우 변화가 심하였다. 댐퍼의 내부 압력이 10 psi 일 때 광열간섭계로 전달되는 진동이 최소였고 이 조건하에서 일반도로 및 고속도로 주변을 운행하였다.

Fig. 9는 광열간섭계를 장착한 레이저용 차량이 주행한 도로 코스와 도로 주행시 측정된 대기 에어로졸 광흡수 계수를 나타낸 그림이다. 실험장치 에어로졸 유입구 전단에 NO_x denuder 를 설치하여 NO_x 에 의한 광흡수계수 영향을 최소화하여 블랙카본에 의해서만 광흡수계수가 변화하는 것을 관찰하였다. 연구소 정문을 출발해서 윌리엄 플로이드 파크웨이를 지나고 롱아일랜드 익스프레스웨이를 통과하여 Rt 27에 도착하여 유턴 후 잠시 정차하였다가 윌리엄 플로이드 파크웨이를 타고 다시 연구소로 돌아오는 코스를 택하였다. 연구소를 출발하여 A 위치에 도달하는 동안에는 에어로졸 광

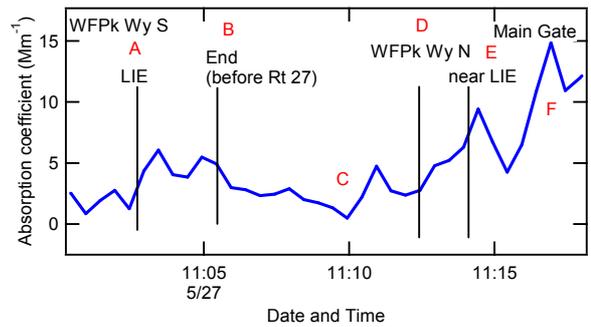
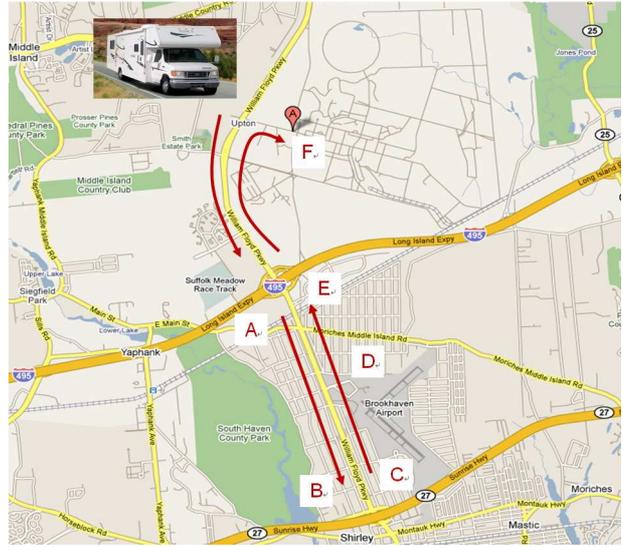


Fig. 9 Absorption coefficient measured during road test

흡수 계수가 낮은 값을 유지하다가 롱아일랜드 익스프레스웨이가 만나는 교차점을 통과할 때 광흡수 계수가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 광흡수 계수의 증가는 A 지점이 고속도로와 만나는 지점에 위치해 교통량이 증가하는데다 인근에 서포크 메도우 주행 트랙이 있어 경주용 차량의 매연이 있기 때문이라 판단된다. A에서 B 위치로 가는 동안 에어로졸 광흡수 계수가 검출되는데 이는 주변에 위치한 브룩헤이븐 공항에서 항공기와 차량들로부터 배출된 배기 배출물 중에 포함된 블랙카본 때문이라 판단된다. C의 위치에서 광열간섭계 점검을 위해 잠시 정차한 후 D와 E를 거쳐 연구소로 돌아가는 동안 C, D, E 주변을 통과할 때 에어로졸 흡수 계수가 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 광흡수 계수의 변화는 전술했던 공항 주변의 차량 및 롱아일랜드 익스프레스웨이를 지나는 차량등의 영향으로 보인다. E에서 F로 가는 동안에도 꾸준히 에어로졸 흡수 계수가 높게 측정되었는데 이 또한 전술했던 바와 같이 주행트랙에 있는

경주용 차량의 영향이라 판단된다. 한편 연구소 정문에서 가장 높은 광흡수 계수가 측정되었는데 이는 연구소 정문에서 출입을 위해 기다리고 있는 많은 차량들로부터 배출된 블랙 카본의 영향 때문이라고 판단된다.

4. 결론

광산란에 관계없이 에어로졸 광흡수를 직접 측정할 수 있는 실험 기법인 광열 간섭법을 이용하여 흡수 표준 기체인 이산화 질소의 광흡수 계수를 측정하였다. 이산화 질소의 광흡수 계수 측정 결과를 이용하여 광열간섭계를 보정하였고 보정 결과는 일반적인 에어로졸 흡수 계수를 정량화하는데 활용된다. 실험실에서 발생된 나이그로신 에어로졸에 대하여 광흡수 측정을 수행하였다. 광열간섭이론에서 알 수 있듯이 에어로졸 광흡수는 동일 크기의 나이그로신의 수농도에 정비례하였다. 실험실에서 발생시킨 에어로졸뿐만 아니라 대기 에어로졸에 대하여 광열간섭법을 적용하여 도로 주변의 에어로졸 광흡수 계수도 측정하였다. 이를 위해 광열간섭계의 진동 흡수용 댐퍼를 설치하였고, 진동이 최소가 되도록 댐퍼 내부 압력을 최적화하였다. 댐퍼 내부 압력의 최적화를 위해 실시간 도로 측정 이전에 도로 주행과 동일한 도로 포장 조건의 원형 트랙을 주행하였다. 이번 연구에 사용된 광열간섭계의 측정 한계는 시간 상수가 10 초일 때 0.4 Mm^{-1} 으로 나타나 매우 민감하기 때문에 대기 에어로졸 측정뿐만 아니라 기체분자, 블랙카본, 브라운 카본 및 기타 흡수 물질들의 광학적 흡수 계수를 측정하는 기초 연구에도 널리 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

여행용 차량 운전을 도와준 Dr. Stephen Springston, 광열간섭계 실험 장치 전반에 걸쳐 많은 토의를 했던 Dr. Arthur Sedlacek 에게 감사의 말씀을 전한다. 본 연구는 한국기술교육대학교 학술진흥교육연구지원비의 지원을 받아 수행된 연구임. 2009년도 교육과학기술부 기본연구지원사업(2009-0076372)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

(1) Solomon, S. E. et. al., 2007, *Technical Summary:*

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

- (2) Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. and Wilbanks, T. J., 2010, "The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment," *Nature*, Vol. 463, pp. 747~756.
- (3) Ishii, Y., Chen, J., and Murata, K., 1987, "Digital Phase-Measuring Interferometry with A Tunable Laser Diode," *Opt. Lett.*, 12, 233-235.
- (4) Stone, J. A., Stejskal, A., and Howard, L., 1999, "Diode Lasers in Length Metrology: Application to Absolute Distance Interferometry," *Int. J. Metrology*, Nov-Dec: pp. 1~7.
- (5) Downs, M. J., 1990, "A Proposed Design for an Optical Interferometer with Sub-Nanometric Resolution," *Nanotechnology*, Vol. 1, pp. 27~30.
- (6) Abou-Zeid, A., and Wiese, P., 1998, "Interferometer with a Wavelength-Tuned Diode Laser for Surface Profilometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 1105~1110.
- (7) Bialkowski, S. E., 1996, *Photothermal Spectroscopy Methods for Chemical Analysis, Vol. 134 Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and its Application*, John Wiley and Sons Publisher, New York.
- (8) Moosmüller, H., and Arnott, W. P., 1996, "Folded Jamin Interferometer: A Stable Instrument for Refractive-Index Measurements," *Opt. Lett.*, Vol. 21, pp. 438~440.
- (9) Moosmüller, H., Arnott, W. P., and Roger, C. F., 1997, "Methods for Real-Time, in situ Measurement of Aerosol Light Absorption," *J. Air and Waste Management Assoc.*, Vol. 47, pp. 157~166.
- (10) Sedlacek, A. J., 2006, "Real-Time Detection of Ambient Aerosols Using Photothermal Interferometry: Folded Jamin Interferometer," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, pp. 064903.
- (11) Lin, H.-B., and Campillo, A. J., 1985, "Photothermal Aerosol Absorption Spectroscopy," *Appl. Opt.*, Vol. 24, pp. 422~433.
- (12) Davis, C. C., 1980, "Trace Detection in Gases Using Phase Fluctuation Optical Heterodyne Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 36, pp. 515~518.
- (13) Davis, C. C., and Petuchowski, S. J., 1981, "Phase Fluctuation Optical Heterodyne Spectroscopy of Gases," *Appl. Opt.*, Vol. 20, pp. 2539~2554 and errata: *Appl. Opt.*, Vol. 20, pp. 4151.
- (14) Dovichi, N. J., 1990, Laser-Based Microchemical

- Analysis, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 61, pp. 3653~3667.
- (15) Davis, C. C., 1996, *Laser and Electro-Optics - Fundamentals and Engineering*, Cambridge University Press, New York.
- (16) Lack, D. A., Lovejoy, E. R., Baynard, T., Pettersson, A., and Ravishankara, A. R., 2006, "Aerosol Absorption Measurement Using Photoacoustic Spectroscopy: Sensitivity, Calibration, and Uncertainty Developments," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 40, pp. 697~708.
- (17) Davidson, J. A., Cantrell, C. A., McDaniel, A. H., Shetter, R. E., Madronich, S., and Calvert, J. G., 1988, "Visible-Ultraviolet Absorption Cross Sections for NO₂ As A Function of Temperature," *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, pp. 7105~7112.
- (18) Vandaele, A. C., Hermans, C., Simon, P. C., Carleer, M., Colin, R., Fally, S., Mérienne, M. F., Jenouvrier, A., and Coquart, B., 1998, "Measurements of the NO₂ Absorption Cross-Section from 42000 cm⁻¹ to 10000 cm⁻¹ (238~1000 nm) at 220 K and 294 K," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, Vol. 59, pp. 171-184.
- (19) Vandaele, A. C., Hermans, A. C., Simon, P. C., Van Roozendaal, M., Guilmot, J. M., Carleer, M., and Colin, R., 1996, "Fourier Transform Measurement of NO₂ Absorption Cross-Section in the Visible Range at Room Temperature," *J. Atmos. Chem.*, Vol. 25, pp. 289~305.
- (20) Harder, J. W., Brault, J. W., Johnston, P. V., and Mount, G. H., 1997, "Temperature Dependent NO₂ Cross Sections at High Spectral Resolution," *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, pp. 3861~3879.
- (21) Owens, M. A., Davis, C. C., and Dickerson, R. R., 1999, "A Photothermal Interferometer for Gas-Phase Ammonia Detection," *Anal. Chem.*, Vol. 71, pp. 1391~1399.
- (22) Brewer, R. J., and Bruce, C. W., 1978, "Photoacoustic Spectroscopy of NH₃ at the 9- μ m and 10- μ m ¹²C¹⁶O₂ Laser Wavelengths," *Appl. Opt.*, Vol. 17, pp. 3746~3749.
- (23) Moosmuller H., Chakrabarty R. K., and Arnott W. P., 2009, "Aerosol Light Absorption and Its Measurement: A Review," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, Vol. 110, pp. 844~878.