



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(11), 893-900(2021)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.11.893>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 레이저 흡수 분광법을 사용한 좁은 시험 구간 내 공기 밀도 측정

심한슬<sup>1</sup>, 정시온<sup>2</sup>, 김경록<sup>3</sup>, 박기수<sup>4</sup>Air Density Measurement in a Narrow Test Section  
Using a Laser Absorption SpectroscopyHanseul Shim<sup>1</sup>, Sion Jung<sup>2</sup>, Gyeongrok Kim<sup>3</sup> and Gisu Park<sup>4</sup>

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

## ABSTRACT

In this study, air density in a narrow test section is measured using a laser absorption spectroscopy system that detects oxygen absorption lines. An absorption line pair at 13156.28 and 13156.62  $\text{cm}^{-1}$  are detected. A gas chamber with a height of 40 mm is used as a narrow test section. A triangular spiral-shaped laser path is applied in the gas chamber to amplify absorption strength by extending laser beam path length. A well-known logarithm amplifier and a secondary amplifier are used to electrically amplify absorption signal. An AC-coupling is applied after the logarithm amplifier for signal saturation prevention and noise suppression. Procedure of calculating spectral absorbance from output signal is introduced considering the logarithm amplifier circuit configuration. Air density is determined by fitting the theoretically calculated spectral absorbance to the measured spectral absorbance. Test conditions with room temperature and a pressure range of 10~100 kPa are made in a gas chamber using a Bourdon pressure gauge. It is confirmed that air density in a narrow test section can be measured within a 16 % error through absorption signal amplification using a triangular spiral-shaped beam path and a logarithm amplifier.

## 초 록

본 연구에서는 산소의 흡수선을 검출하는 레이저 흡수 분광 시스템을 사용하여 좁은 시험 구간 내의 공기 밀도가 측정되었다. 13156.28과 13156.62  $\text{cm}^{-1}$ 에 존재하는 산소의 흡수선 한 쌍이 측정되었다. 높이 40 mm를 가지는 기체 챔버가 좁은 시험 구간으로 사용되었다. 레이저 진행 경로를 확장하여 흡수 세기를 증폭시키기 위해 삼각 나선 형태의 레이저 광경로가 기체 챔버 내에 구성되었다. 잘 알려진 로그 증폭기와 2차 증폭기를 사용하여 흡수선 신호를 전기적으로 증폭하였다. 로그 증폭기 이후 신호 포화 방지 및 노이즈 억제를 위해 AC 커플링이 적용되었다. 로그 증폭기 회로 구성을 고려하여 출력 신호로부터 파수별 흡광도를 계산하는 과정이 소개되었다. 이론적으로 계산된 파수별 흡광도를 실험적으로 측정된 파수별 흡광도에 선 맞춤하여 공기의 밀도가 측정되었다. 부르돈 압력계를 사용하여 기체 챔버 내에 상온과 10~100 kPa 범위 내에서 다양한 압력을 가지는 시험 조건들이 만들어졌다. 삼각 나선 형태의 광경로 및 로그 증폭기를 사용한 흡수 신호 증폭을 통해, 16 %의 오차 이내에서 좁은 시험 구간의 공기 밀도가 측정될 수 있음이 확인되었다.

**Key Words** : Laser Absorption Spectroscopy(레이저 흡수 분광법), Laser Beam Path(레이저 광경로), Logarithm Amplifier(로그 증폭기), Oxygen Gas(산소 기체), Density(밀도)

† Received : July 1, 2021    Revised : August 26, 2021    Accepted : September 27, 2021

<sup>1,3</sup> Doctoral Student, <sup>2</sup> Master Student, <sup>4</sup> Associate Professor

<sup>4</sup> Corresponding author, E-mail : gisu82@kaist.ac.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

파장 가변 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, 이하 TDLAS)은 레이저를 시험 기체에 통과시켜 기체의 흡수선의 모양과 세기를 측정하고, 이를 분광학적으로 분석하여 유동의 온도, 밀도, 속도 등을 측정하는 기술이다[1-3].

TDLAS 기술은 비접촉식으로 온도, 밀도, 속도 등 다양한 유동 특성을 측정할 수 있으므로, 고속 비행체의 비행 및 엔진 유동 상태 진단에 사용된다[4,5]. 대기를 비행하는 항공체에 TDLAS 기술을 적용할 때는 산소에 대한 흡수선을 측정한다. 하지만 낮은 산소의 흡수선 강도 및 고고도 비행 시의 낮은 산소 분압에 의해 측정되는 흡수선 세기가 약할 수 있다[4]. 또한 비행체에 따라 내부 유로 내의 레이저 진행 경로의 길이가 짧아 흡수선의 세기가 약할 수 있다. 따라서 좁은 시험 구간 내에서도 약한 흡수선을 측정하기 위해 광경로 길이 확장 기술이나 흡수선 신호 증폭 기술이 필요하다.

광경로 길이 증폭은 역반사기(Retroreflector)를 사용하여 평행한 왕복 광경로를 구성하는 방식이 흔히 쓰인다[4-6]. 이러한 광경로는 유속 측정을 위해 유동에 대해 기울여 설치할 시 레이저가 왕복하는 동안 서로 다른 도플러 효과를 받는다. 이 때문에 단일 도플러 효과를 받는 흡수선의 세기가 약해지는 단점이 존재한다. 흡수선 신호 증폭 기술의 경우 로그 증폭기를 활용한 Direct absorption spectroscopy(DAS)나 2f-Wavelength modulation spectroscopy(WMS) 등의 기술이 존재한다[6-9]. 이 중 로그 증폭기를 활용한 DAS[6-8]는 2f-WMS에 비해 비교적 간단한 레이저 구동 및 후처리 과정을 거치고도 신호 증폭이 가능하게 한다.

본 연구에서는 좁은 유로 내의 공기 밀도 측정을 위한 레이저 흡수 분광 시스템을 구축하고, 진공에서 상압 사이의 공기 내 산소의 흡수선을 검출하여 공기 밀도를 측정하였다. 광경로 길이 증폭을 위해 삼각 나선 모양의 레이저 광경로가 구성되었다. 로그 증폭기와 2차 증폭기를 사용하여 흡수선을 증폭하였다. AC 커플링을 사용하여 신호 포화를 방지하고 노이즈를 억제하였다. 로그 증폭기의 특성을 사용하여 측정된 신호로부터 파수별 흡광도가 계산되어졌으며, 이론적으로 계산된 흡광도의 선 맞춤을 통해 공기의 밀도가 측정되었다. 또한 AC 커플링과 2차 증폭기의 유무에 따른 공기 밀도 측정 오차가 계산되었다.

## II. 레이저 흡수 분광법

### 2.1 이론적 배경

TDLAS 기술은 시간에 따라 레이저의 파장을 변화

시켜 흡수선의 개형 및 세기를 측정한다. 레이저가 측정 대상 기체를 통과할 때 레이저의 광량 감소는 Eq. 1과 같은 Beer's law를 통해 계산된다[10].

$$I(\nu) = I_0(\nu)\exp[-k(\nu)L] \quad (1)$$

이때,  $\nu[\text{cm}^{-1}]$ 는 레이저의 파수(Wavenumber),  $I_0$ 는 기체를 통과하기 전 레이저의 광량,  $I$ 는 통과한 후 광량,  $k(\nu)[\text{cm}^{-1}]$ 는 파수별 흡수 계수,  $L[\text{cm}]$ 은 기체 내에서의 레이저의 광경로 길이이다. 파수별 흡수 계수와 광경로 길이를 곱한 값은 무차원의 파수별 흡광도(Absorbance)이며, Eq. 2와 같이 표현된다.

$$\alpha(\nu) = k(\nu)L = S(T)\Phi(\nu)PX_iL \quad (2)$$

이때  $S(T)[\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}]$ 는 기체 온도  $T[\text{K}]$ 에서 특정 흡수선의 선강도,  $\Phi(\nu)[\text{cm}]$ 는 선윤곽 함수,  $P[\text{atm}]$ 는 기체의 압력 그리고  $X_i$ 는 시험 기체 내 측정 대상 기체의 몰분율이다. 선윤곽 함수는 특정 파수에 존재하는 흡수선이 압력, 온도 등에 의해 선폭이 확장되는 것을 모델화한 것이다. 선폭 확장은 기체 분자의 열운동에 의한 도플러 효과와 기체 분자 사이의 충돌에 의해 발생한다. 일반적인 상황에서는 온도와 압력 모두 선폭 확장에 기여하므로 두 선폭 확장 효과를 모두 포함하는 Voigt 프로파일이 널리 쓰인다. Voigt 프로파일은 온도와 압력의 함수이다.

결국 파수별 흡광도는 기체의 온도와 측정 대상 화학종의 분압에 대한 함수이다. 파장 가변 레이저를 사용한 흡수 분광 측정을 통해 파수별 흡광도를 측정하고, 이를 이론적 파수별 흡광도와 선 맞춤을 수행하여 몰분율이 고정된 상태에서 기체의 온도와 압력이 결정될 수 있다. 이상기체 상태방정식을 통해 결정된 기체의 온도와 압력으로부터 밀도가 계산된다.

### 2.2 흡수선 선정

본 연구에서는 공기의 밀도를 측정하기 위해 산소가 측정 대상 기체 분자로 선택되었다. 12987~13175  $\text{cm}^{-1}$ 의 파수 대역에는 산소의 흡수선 밴드인 A Band가 존재한다[11,12]. 본 연구에서는 A Band 내에서 다음과 같은 기준으로 흡수선을 선정하였다.

첫째, 본 연구에서 사용된 레이저를 상온에서 구동할 때 파장 가변 범위인 13140~13158  $\text{cm}^{-1}$  이내에 존재하는 A Band 흡수선들이 1차적으로 선별되었다.

둘째, 상온에서 흡수선을 측정하기 때문에 상온에서 흡수선의 세기가 강한 흡수선을 2차적으로 선별하였다. 흡수선의 세기 기준은 상온에서의 선강도  $S(T_0)$ 의 값이  $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$  이상이다. 첫째 기준과 둘째 기준으로 총 10개의 흡수선이 선별되었다.

셋째, 전류에 의한 레이저의 파장 가변 범위 내에서 최대한 많은 흡수선을 관찰하기 위해 간격이 좁

은 흡수선들이 선택되었다. 본 연구에서 사용된 DFB 레이저의 전류에 의한 파장 가변 범위는  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  이하이므로  $13156.28$ 과  $13156.62 \text{ cm}^{-1}$ 에 존재하는 흡수선 한 쌍이 측정 흡수선으로 최종 선정되었다.

## 2.3 레이저 흡수 분광 장비 및 구동

### 2.3.1 레이저 흡수 분광 장비 시스템

Figure 1은 본 연구에서 사용된 레이저 흡수 분광 시스템을 보여준다. 레이저 흡수 분광 시스템은 크게 레이저 및 구동 시스템과 레이저를 받는 광센서 및 로그 증폭기 회로, 광학계 그리고 시험 기체 환경을 만드는 기체 챔버로 구성된다.

파장 가변 레이저에는 이를 구동하기 위한 레이저 드라이버와 온도 제어기가 연결되어 있다. 흡수 발생기를 사용하여 레이저 파장 가변 파형이 생성되었다. 레이저는 Toptica Eagleyard 사의 DFB(Distributed feedback) 레이저가 사용되었다. 레이저 드라이버와 온도 제어기는 Cosmotec 사에서 설계 및 제작되었다. 흡수 발생기는 GW Instek 사의 MFG-2230M 모델이 사용되었다.

빔스플리터와 광학창 등의 투과성 광학 부품에서는 레이저의 편광 성분에 따라 반사율이나 투과율이 달라질 수 있으므로 일정한 편광 성분만을 추출하기 위해 선형 편광판이 레이저 앞에 설치되었다. 이후 레이저광은 빔스플리터에 의해 나뉘어 Reference 광센서와 Sample 광센서로 각각 향하게 된다. Sample 광센서로 향하는 레이저는 기체 챔버를 거치며 측정 대상 기체를 통과한다. 사용된 레이저가 가시광 파장에 속하기 때문에 가시광 측정이 가능한 실리콘 소재의 광센서가 사용되었다. 외부 광원에 의한 영향을 최소화하기 위해 레이저를 포함한 모든 광학계는 별도의 금속 상자 내부에 설치되었으며, band-pass filter가 레이저 광경로 상에 설치되었다. Band-pass filter는  $780 \text{ nm}$ 의 중심파장과  $50 \text{ nm}$ 의 FWHM를 가진다.

Reference 광센서와 Sample 광센서에서 출력된 광전류(Photocurrent)는 로그 증폭기 회로로 인가되었다. 로그 증폭기 회로는 두 광센서에서 전달된 광전류의 비에 로그 함수를 취하여 출력한다.

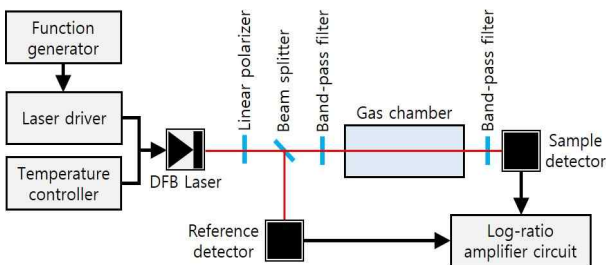


Fig. 1. Laser absorption spectroscopy system using a logarithm amplifier

### 2.3.2 파장 가변 레이저

DFB 레이저는 온도에 의해 큰 파장 가변이 가능하며, 인가되는 전류에 의해 작은 파장 가변이 가능하다[13]. 본 연구에 사용된 레이저는 온도에 의한 파장 가변 속도가 전류에 의한 파장 가변보다 상당히 느리기 때문에 흡수선을 측정하기 위한 파장 가변 방식은 전류에 의한 방식이 사용되었다. 레이저 온도는 레이저 파장 가변 범위가 측정 흡수선 한 쌍을 포함할 수 있도록 설정되었으며, 온도 제어 회로를 사용하여 일정한 온도로 유지되었다.

흡수 발생기에서 Ramp형 파형의  $5 \text{ kHz}$ 의 주파수를 가지는 신호가 생성되었으며, 레이저 드라이버 회로가 동일한 파형 및 주파수로 레이저를 구동하였다. 파장 가변의 한 주기의 길이는  $200 \mu\text{s}$ 이며, 실험 시 주기가 계속 반복되었다.

### 2.3.3 로그 증폭기

Figure 2는 로그 증폭기 회로 구성도를 보여준다. 로그 증폭기 회로는 로그 증폭기, 2차 증폭기, 그리고 로그 증폭기와 2차 증폭기 사이의 AC 커플링을 위한 커패시터로 구성된다. 로그 증폭기 회로에서는 2차 증폭기를 거치기 전 신호와 2차 증폭기를 거친 후 신호가 출력되며, 이는 디지털 오실로스코프를 통해 측정되었다. 디지털 오실로스코프의 샘플링 속도는  $20 \text{ MSample/s}$ 이다. 레이저 파장 가변의 한 주기 내 데이터 포인트 개수는  $4,000$ 개이다.

로그 증폭기는 Analog Devices 사의 AD8305 모델이 사용되었다. 로그 증폭기에는 Sample 광센서와 Reference 광센서가 역방향 바이어스 상태로 설치되어 있으며, 발생한 광전류가 로그 증폭기에 입력된다. 로그 증폭기는 아날로그 방식으로 입력된 두 전류의 비율에 로그가 취하여 자체 게인에 따라 증폭하여 출력한다. 로그 증폭기에서 출력된 신호는 Eq. 3과 같이 표현된다[14].

$$V_{\log,dc} = G_1 \log_{10} \frac{i_{\text{samp}}}{i_{\text{ref}}} \quad (3)$$

이때  $V_{\log,dc} [\text{V}]$ 는 로그 증폭기에서 출력된 전압,  $G_1$ 은 로그 증폭기의 게인, 그리고  $i_{\text{samp}}$ 와  $i_{\text{ref}} [\text{mA}]$ 는 각

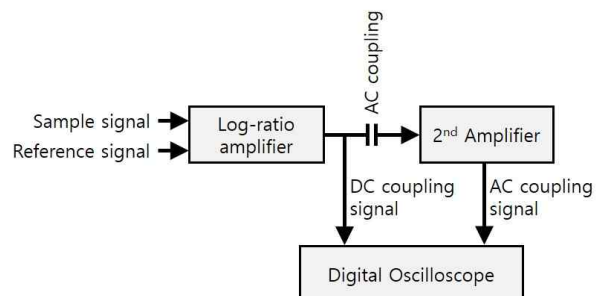


Fig. 2. Logarithm amplifier circuit block diagram

각 Sample 광센서와 Reference 광센서로부터 수신된 광전류를 의미한다. 로그 증폭기에서 출력된 신호는 커패시터를 통해 AC 커플링이 된 후 단순 전압 증폭기인 2차 증폭기로 입력된다. 2차 증폭기를 거쳐 출력된 신호는 Eq. 4와 같이 표현된다.

$$V_{\log,ac} = G_2 \left( G_1 \log_{10} \frac{i_{\text{sample}}}{i_{\text{ref}}} + V_{\text{offset}} \right) \quad (4)$$

이때  $V_{\log,ac}$  [V]는 2차 증폭기에서 출력된 전압,  $G_2$ 는 2차 증폭기의 게인, 그리고  $V_{\text{offset}}$  [V]는 AC 커플링에 의해 발생한 전압 변화에 의한 값이다. Eq. 4는 상수를 정리하여 Eq. 5과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{\log,ac} = G \quad (5)$$

$G$ 는 로그 증폭기와 2차 증폭기 게인의 곱이다. 측정 상황이 준정상상태일 때,  $V_{\text{offset}}$ 은 측정 시간 동안 상수로 가정할 수 있기 때문에 2차 증폭기의 게인과 곱해진 상수  $C_{\text{arbi}}$ 로 나타내어질 수 있다.

광센서는 역방향 바이어스가 걸린 포토다이오드이며, 광전류는 광량에 비례한다. 따라서, Eq. 5는 Eq. 6과 같이 나타내어질 수 있다.

$$V_{\log,ac} = G \quad (6)$$

$I_{\text{sample}}$ 와  $I_{\text{ref}}$ 는 각각 Sample 광센서와 Reference 광센서에 입사하는 레이저 광량이다.  $I_{\text{ref}}$ 와  $I_{\text{sample}}$ 의 차이가 커서  $V_{\log,dc}$  신호가 0 V에서 크게 벗어나면 2차 증폭기를 통해 추가적 증폭 시 신호 포화 상태가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 로그 증폭기 출력 신호와 2차 증폭기 사이에 AC 커플링이 적용되었다 [6,7].

### III. 공기 밀도 측정

#### 3.1 시험 환경

##### 3.1.1 기체 챔버

Figure 3은 기체 챔버의 사진과 개략도를 보여준다. 기체 챔버는 직육면체의 형태이며, 40 mm의 높이를 가진다. 기체 챔버 내 기체의 압력을 조절하기 위해 진공 펌프와 벤트관이 설치되었다. 내부 압력을 목표 압력으로 설정하기 위해 부르돈 압력계가 설치되었다. 내부 온도는 K 타입 열전대를 사용하여 측정되었다. 기체 챔버의 하단에는 레이저가 기체 챔버를 관통할 수 있도록 사파이어 재질의 광학창이 설치되었다. 레이저를 포함한 모든 광학계는 기체 챔버 외부의 상온 및 상압의 환경에 노출되었다.

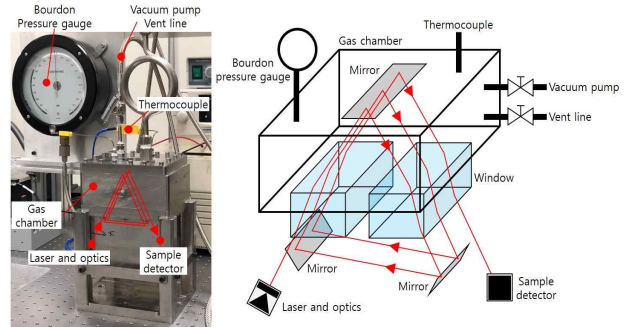


Fig. 3. Picture and schematic of the gas chamber

##### 3.1.2 레이저 광경로

레이저는 Fig. 3에서 보여지듯 삼각 나선의 형태로 기체 챔버를 통과한다. 삼각 나선 형태의 레이저 광경로 구성을 위해 기체 챔버 내부의 천장면에 평면 거울이 설치되었으며, 기체 챔버 외부에 60도로 경사진 평면 거울 2개가 설치되었다. 레이저는 한쪽 경사 거울의 측면을 빗겨가며 한쪽 광학창을 통과해 기체 챔버 내에 진입한 후 천장 반사거울에서 반사되어 반대쪽 광학창을 통해 챔버를 빠져나온다. 이후 반대편 경사 거울에서 반사되어 하나의 정삼각형 모양 광경로를 구성한다. 정삼각형 광경로를 여러번 반복하여 삼각 나선 형태로 진행한 후 최종적으로는 기체 챔버 외부의 Sample 광센서에 도달한다. 시험 기체를 통과하는 레이저 광경로의 총 길이는 277 mm이다.

삼각 나선 형태의 레이저 광경로는 다음과 같은 장점을 가진다.

첫째, 좁은 폭을 가지는 시험 환경에서 나선 형태로 여러 번 시험 기체를 관통하기 때문에 광경로 길이가 증대된다.

둘째, 기체 챔버 내부에서 레이저가 일정한 각도를 유지한 채로 진행하기 때문에 기체 챔버의 측면 방향에서 유동이 존재할 때 흡수선의 도플러 효과가 관찰될 수 있다. 이를 통해 좁은 유로 내 유속 측정 및 질량 유속 측정에 활용될 수 있다.

셋째, 광학창에 경사지게 레이저가 통과하기 때문에 광학창의 양면에서 발생하는 미세한 광반사에 의한 에탈론(Etalon) 효과가 흡수선 신호 측정 시에 끼치는 영향을 현저히 낮춘다.

하지만 이러한 삼각형 형태의 광경로는 시험 기체를 통과하는 두 변을 제외한 나머지 한 변에서 시험 기체와 다른 기체에 의한 흡수가 발생할 수 있으며, 이에 대한 보정이 필요하다.

#### 3.2 신호 후처리

오실로스코프를 통해 측정된 로그 증폭기 출력 신호는 시간에 따른 전압 신호이다. 측정된 신호를 이론적 흡수선과 비교하기 위해 가로축을 시간에서 파수로, 세로축을 전압에서 흡광도로 변환하였다.

### 3.2.1 시간에 따른 레이저 파수 변환

시간에 따른 파수 변화는 측정된 흡수선들의 중심 파수값들을 사용하여 계산되었다. 측정된 흡수선들의 파수값인 13156.28과 13156.62  $\text{cm}^{-1}$ 에 각각 해당하는 시간값이 사용되었다. 측정된 흡수선의 개수가 2개이므로 시간에 따른 레이저 파수 변환식이 1차 다항식으로 표현되었다.

### 3.2.2 외부 흡수선 보정 및 흡광도 계산

Figure 4는 시험 기체의 압력이 상압일 때와 진공일 때, 로그 증폭기에서 AC 커플링을 거쳐 최종 출력된 신호를 보여준다. Fig. 3에서도 보여지듯이 레이저는 기체 챔버 내의 시험 기체뿐만 아니라 외부의 상온, 상압의 공기도 통과하기 때문에 측정된 흡수선 신호는 시험 기체와 외부 기체에 의한 흡수선이 중첩되어 나타난다. 따라서 시험 기체에 대한 흡수선만을 측정하기 위해 외부 기체에 의한 흡수선을 다음과 같은 과정을 통해 제거하였다.

$I_{\text{samp}}$ 와  $I_{\text{ref}}$ 는 시험 기체와 외부 기체의 흡수를 함께 고려하여 각각 Eq. 7과 8로 나타낼 수 있다[5].

$$I_{\text{samp}}(\nu) = rI_0(\nu)\tau_{\text{optic}}e^{-\alpha_{\text{test}}(\nu)}e^{-\alpha_{\text{out}}(\nu)} \quad (7)$$

$$I_{\text{ref}}(\nu) = (r-1)I_0(\nu) \quad (8)$$

이때  $r$ 은 빔스플리터의 투과율,  $\tau_{\text{optic}}$ 은 Sample 레이저광이 거치는 모든 광학 부품들의 총투과율,  $\alpha_{\text{test}}$ 는 시험 기체의 흡광도 그리고  $\alpha_{\text{out}}$ 은 외부 기체의 흡광도이다.  $r$ 과  $\tau_{\text{optic}}$ 은 상수이므로 Eq. 9와 같은 상수  $C_3$ 가 정의될 수 있다.

$$C_3 = \frac{r-1}{r\tau_{\text{optic}}} \quad (9)$$

Eq. 7, 8, 9를 Eq. 6에 대입하면 Eq. 10과 같다.

$$V_{\text{log.ac}}(\nu) = G \quad (10)$$

시험 기체가 존재하지 않을 경우  $V_{\text{log.ac}}$ 는 Eq. 11과 같다. 이때  $C_{\text{arbi}}$ 는 다른 값을 가질 수 있다.

$$V_{0,\text{log.ac}}(\nu) = G \quad (11)$$

시험 기체와 외부 기체의 흡수가 모두 포함된 출력 신호( $V_{\text{log.ac}}$ )에서 외부 기체의 흡수만 존재할 때의 신호( $V_{0,\text{log.ac}}$ )를 소거하여 시험 기체의 흡수에 의한 출력 신호만 추출하면 Eq. 12와 같다.

$$V_{\text{log.ac}} - V_{0,\text{log.ac}} = G \quad (12)$$

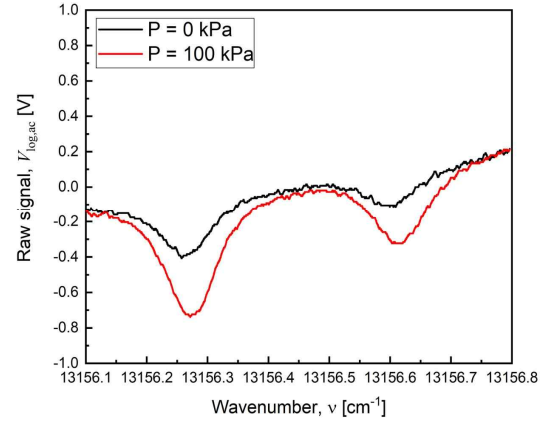


Fig. 4. Measured total absorption signal(Red) and external gas absorption signal(Black)

시험 기체 흡수에 의한 출력 신호를 시험 기체의 흡광도에 대해 정리하면 Eq. 13과 같다.

$$\alpha_{\text{test}}(\nu) = -\ln \left[ 10^{\left( \frac{V_{\text{log.ac}} - V_{0,\text{log.ac}} - \Delta C_{\text{arbi}}}{G} \right)} \right] \quad (13)$$

Figure 4에서 보여지는 시험 기체가 존재하지 않을 때의 로그 증폭기 출력 신호를 측정하여 시험 기체가 존재할 때의 신호에서 빼면 Eq. 13에서처럼 시험 기체의 흡광도가 계산된다. AC 커플링과 2차 증폭기를 거쳐 출력된 신호의 경우 시험 기체의 압력에 따라 흡수선 모양이 변화하여  $C_{\text{arbi}}$ 값이 변화할 수 있으므로  $\Delta C_{\text{arbi}}$ 가 0이 아닐 수 있다. 기체에 대한 흡수가 전혀 없는 파수 영역에서  $V_{\text{log.ac}}$ 와  $V_{0,\text{log.ac}}$ 를 일치시킬 때  $\Delta C_{\text{arbi}}$ 가 계산될 수 있다. 한 주기의 양 끝단에서는 기체에 대한 흡수가 거의 일어나지 않기 때문에 이를 이용하여  $\Delta C_{\text{arbi}}$ 를 계산하였다.

## 3.3 공기 밀도 측정

### 3.3.1 압력에 따른 흡수선 측정

기체 챔버 내 공기 온도를 상온으로 유지시킨 채 공기의 압력을 변화시키는 방식으로 기체 챔버 내부의 밀도를 변화시켰다. 10 kPa부터 100 kPa까지 10 kPa 단위로 나누어 총 10개의 실험 조건을 생성하였다. 각 실험 조건에서의 압력 설정은 브루돈 압력계를 사용하여 수행되었다. 기체 챔버 내 시험 기체 압력을 0 kPa으로 만든 후  $V_{0,\text{log.ac}}$ 가 측정되었으며, 기체 압력을 변화해가며  $V_{\text{log.ac}}$ 를 측정하였다. 파수별 흡광도 측정 시 노이즈를 최소로 감소시키기 위해 128개의 주기를 모아 누적 평균하였다.

브루돈 압력계와 열전대에서 각각 측정된 압력과 온도를 이용하여 Eq. 2로부터 이론적 파수별 흡광도가 계산되었다. 계산된 이론적 파수별 흡광도는 측정된 파수별 흡광도와 비교되었다.

### 3.3.2 공기 밀도 산출

측정된 파수별 흡광도에 이론적으로 계산된 파수별 흡광도를 선 맞춤함으로써 공기 밀도를 산출하였다. 선 맞춤은 한 주기 내 모든 데이터 포인트에 대해 측정된 파수별 흡광도와 계산된 파수별 흡광도 사이의 평균 제곱근 편차가 최소가 될 때까지 Eq. 2의 압력 입력값을 변화시켜가며 수행되었다. 선 맞춤을 통해 결정된 압력값과 열전대에서 측정된 상온의 온도값을 사용하여 밀도의 측정값이 계산되었다. 시험 기체의 밀도 측정값( $\rho_{\text{test}}$ )은 부르돈 압력계를 사용하여 설정된 기체 챔버 내 밀도값( $\rho_{\text{test,set}}$ )과 비교되었다.

## IV. 결과 및 분석

### 4.1 압력에 따른 흡수선 측정 결과

Figure 5는 시험 기체의 압력 변화에 따른 로그 증폭기와 2차 증폭기의 출력 신호 측정 결과를 1개 주기의 시간 범위만큼 보여준다. 가로축은 시간으로, 주기의 시작점을 0으로 설정하였다. 시험 기체의 온도는 298 K으로 유지되었다. 약 65와 140  $\mu\text{s}$  근처에서 각각 13156.62와 13156.28  $\text{cm}^{-1}$ 의 파수를 가지는 흡수선들의 존재가 확인되었다. 압력이 증가할 때 흡수선의 세기와 선폭 모두 증가하는 것도 관찰되었다.

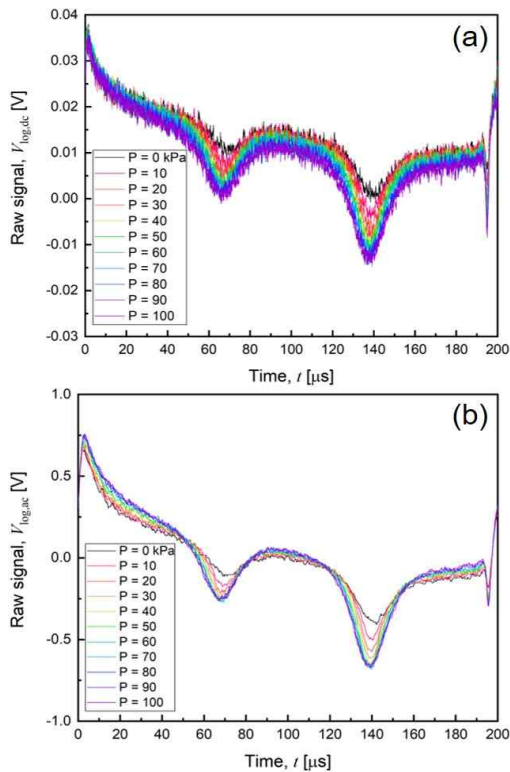


Fig. 5. Measured signal at different test gas pressures, (a) Logarithm amplifier, (b) Secondary amplifier

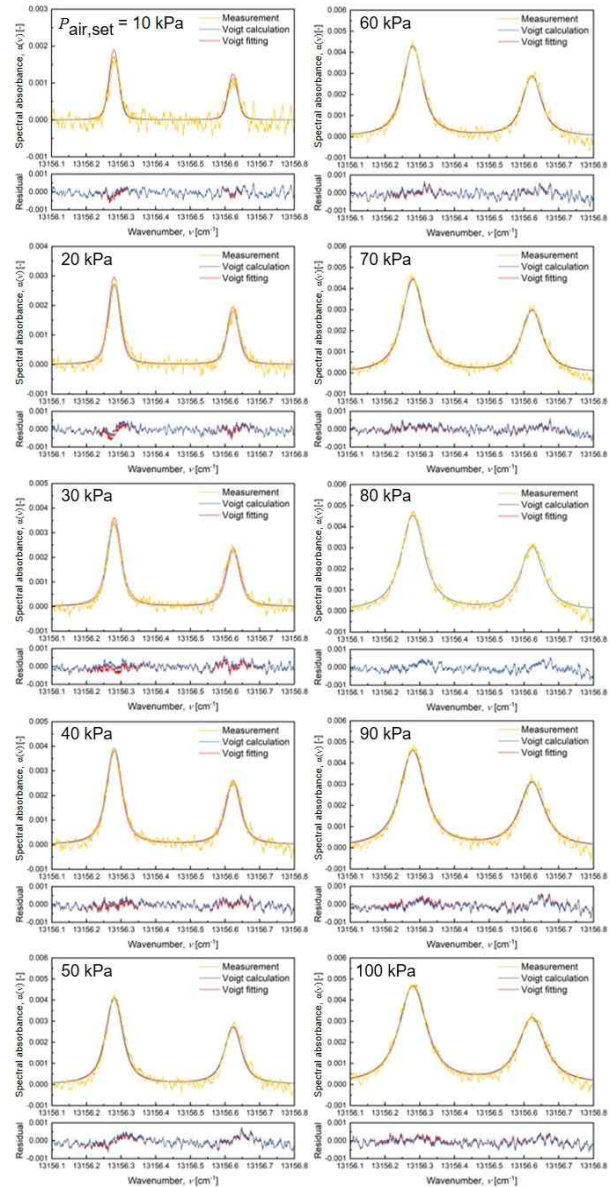


Fig. 6. Measured and theoretical calculated spectral absorbance according to pressure

흡수선 주변 영역인 약 20~40  $\mu\text{s}$  및 170~190  $\mu\text{s}$  에서는 압력이 증가함에 따라 흡수가 발생하여 신호의 높이가 점점 낮아져야 한다. 로그 증폭기 출력 신호( $V_{\text{log,dc}}$ )는 압력이 증가함에 따라 흡수선 주변 영역의 신호 높이가 점점 낮아짐이 관찰되었으나 AC 커플링이 적용된 2차 증폭기 출력 신호( $V_{\text{log,ac}}$ )는 압력이 증가함에 따라 신호 높이가 높아졌다. 이는 2차 증폭기 출력 신호의 경우 압력에 따라 흡수선 모양이 변화하여  $C_{\text{arbi}}$  값이 변화하였기 때문이다. 압력에 따라  $C_{\text{arbi}}$  값이 변화하는 것이 확인되었으므로  $\Delta C_{\text{arbi}}$  가 모든 압력 조건에 대해 각각 산출되었다.

흡수선 크기에 대한 노이즈의 세기를 관찰하였을 때 로그 증폭기 출력 신호에 비해 AC 커플링이 적

용된 2차 증폭기 출력 신호에서의 노이즈가 현저히 낮은 것이 확인되었다. 2차 증폭기가 단순 증폭기인 점을 고려하였을 때 AC 커플링 커패시터의 유무가 노이즈 제거에 효과적임이 관찰되었다.

Figure 6은 2차 증폭기 출력 신호로부터 산출된 파수별 흡광도 측정값, 이론적으로 계산된 파수별 흡광도 그리고 이론적으로 계산된 흡광도를 측정된 값에 선 맞춤한 결과를 보여준다. 또한 이론적으로 계산된 파수별 흡광도와 측정값 사이의 잔차(Residual)가 계산되어 각 그래프 하단에 같이 보여진다. 모든 시험 기체의 압력 경우들에 대해 측정된 파수별 흡광도가 계산된 파수별 흡광도와 일치하는 것이 확인되었다.

## 4.2 공기 밀도 측정 결과

Figure 7은 이론-실험 간 선 맞춤을 통해 측정된 시험 기체의 밀도 측정값을 시험 기체의 설정 압력으로부터 산출된 밀도 설정값과 비교한 것을 보여준다. 밀도 측정값이 밀도 설정값과 정확히 일치할 때 밀도 측정값들은 Fig. 7 내에서  $Y = X$  선상에 놓인다.

AC 커플링의 존재에 따른 밀도 측정의 정확도를 관찰하기 위해 선 맞춤은 로그 증폭기 출력 신호와 2차 증폭기 출력 신호에 각각 수행되었다. 실험 결과로부터, 로그 증폭기 출력 신호와 2차 증폭기 출력 신호로부터 산출된 각각의 밀도 측정값은  $Y = X$  선에 크게 벗어나지 않는 것이 확인되었다. 이를 통해 다양한 압력에 따른 밀도 측정값과 밀도 설정값의 경향성이 상당히 일치함을 보여준다.

Figure 8은 로그 증폭기 출력 신호와 2차 증폭기 출력 신호로부터 산출된 밀도 측정값들과 밀도 설정값 사이의 오차를 보여준다. AC 커플링이 적용되지 않은 로그 증폭기 출력 신호에서 산출된 밀도 측정값은 낮은 밀도 실험 환경에서 높은 오차를 보인다. 낮은 밀도 환경에서는 밀도 측정값의 작은 편차가 높은

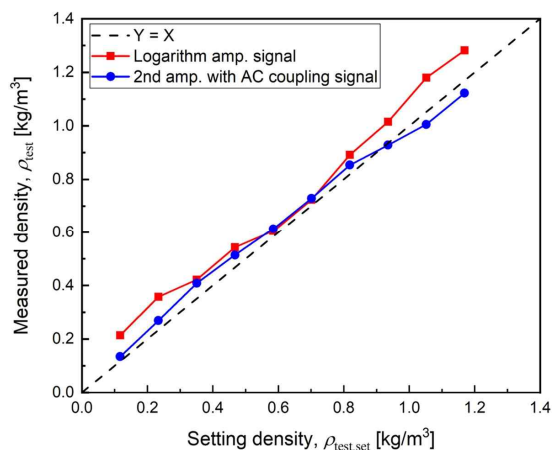


Fig. 7. Air density measurement results from the output signal of the logarithm amplifier and the secondary amplifier

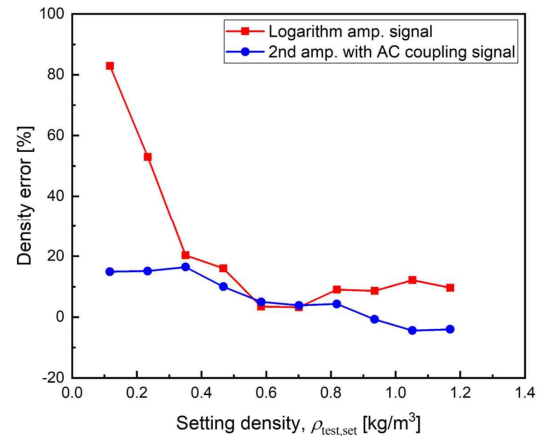


Fig. 8. Density measurement error results from the output signal of the logarithm amplifier and the secondary amplifier

오차를 발생시킬 수 있으며, 밀도 자체의 편차는 최대  $0.12 \text{ kg/m}^3$  이하이다.  $0.3 \text{ kg/m}^3$  이상의 공기 밀도 환경에서는 두 출력 신호 모두 20%의 오차 범위 내에서 밀도를 측정하는 데에 사용될 수 있음이 확인되었다. 기존 연구[2,6,7]들의 기체 압력 혹은 밀도 측정 정확성과 비교하였을 때 본 연구의 밀도 측정 과정은 흡광도가 낮음에도 불구하고 높은 정확도를 가진다. AC 커플링이 적용된 2차 증폭기 출력 신호는 로그 증폭기 출력 신호와는 다르게 노이즈 세기가 현저히 낮아 낮은 밀도 환경에서도 최대 16%의 오차 범위 내에서 밀도를 측정할 수 있음이 확인되었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 레이저 흡수 분광 시스템을 구축하여 좁은 시험 구간 내의 공기 밀도를 측정하였다. 약한 산소 흡수선을 검출하기 위해 삼각 나선 모양 광경로 사용을 통해 레이저 진행 길이를 확장하였으며, 로그 증폭기와 2차 증폭기를 사용하여 흡수선 신호를 증폭하였다. 산소 분자의  $760 \text{ nm}$  파장 대역의 흡수선 신호가 측정되었다. 로그 증폭기 신호로부터 파수별 흡광도를 계산하는 방법이 소개되었다. 기체 챔버를 사용하여 상온과  $10\sim 100 \text{ kPa}$ 의 압력 범위를 가지는 시험 기체 환경을 생성하였다. 시험 기체에서의 파수별 흡광도가 측정되었으며, Voigt 프로파일을 적용한 계산된 파수별 흡광도를 선 맞춤하여 밀도값을 측정하고 설정된 밀도값과 비교되었다.

실험 결과, 밀도 측정값은 밀도 설정값과 최대 16% 오차 범위 이내로 일치하였다. 로그 증폭기 또는 AC 커플링을 거친 2차 증폭기의 출력 신호 및 밀도 측정 결과로부터 AC 커플링을 적용하였을 때 흡수선 신호의 노이즈 감소 및 밀도 측정의 정확도 향상이 확인되었다. 삼각 나선 모양 광경로 및 로그 증폭기를

사용한 본 TDLAS 시스템은 좁은 유로 내에서도 산소의 흡수선을 검출하고 밀도를 측정할 수 있음이 확인되었으며, 이는 비행 상태 진단 및 엔진 내부 유동 측정 등에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청 산하 국방과학연구소의 선도형 핵심기술(응용연구) 사업에 의한 연구비 지원을 받아 수행된 연구임(No. UC190056CD).

## References

- 1) Mihalcea, R. M., Baer, D. S. and Hanson R. K., "Diode Laser Sensor for Measurements of CO, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> in Combustion Flows," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 33, 1997, pp. 8745~8752.
- 2) Liu, J. T. C., Rieker, G. B., Jeffries, J. B., Gruber, M. R., Carter, C. D., Mathur, T. and Hanson, R. K., "Near-Infrared Diode Laser Absorption Diagnostics for Temperature and Water Vapor in a Scramjet Combustor," *Applied Optics*, Vol. 44, No. 31, 2005, pp. 6701~6711.
- 3) Sun, K., Sur, R., Chao, X., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., Pummill, R. J. and Whitty, K. J., "TDL Absorption Sensors for Gas Temperature and Concentrations in a High-Pressure Entrained-Flow Coal Gasifier," *Proceeding of The Combustion Institute*, June 2012, pp. 3593~3601.
- 4) O'Byrne, S., Kurtz, S. W., Krishna, Y., Rodriguez, C., Aizengendler, M. and Davies, J., "Diode Laser Sensor for Scramjet Inlets: Final Year Report," University of New South Wales, Australian Defence Force Academy Rept, AOARD-10-4075, Kensington, NSW, Australia, July 2011.
- 5) Kurtz, J., Aizengendler, M., Krishna, Y., Walsh, P. and O'Byrne, S., "Rugged, Scramjet Inlet Temperature and Velocity Sensor: Design and Ground Test," *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 2, 2016, pp. 399~407.
- 6) So, S., Yoo, M., Maeng, S. and Lee, C., "Study on O<sub>2</sub> Concentration Measurement in High Temperature Furnace Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy," *The Korean Society of Energy & Climate Change*, Vol. 12, No. 2, 2017, pp. 115~125.
- 7) Kurtz, J., Aizengendler, M., Krishna, Y., Walsh, P., Brown, M. and O'Byrne, S., "Subsonic In-Flight Temperature and Pressure Measurements Using a Scramjet Inlet Flow Sensor," *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 3, 2016, pp. 1007~1013.
- 8) Krishna, Y., O'Byrne, S. and Kurtz, J. J., "Baseline Correction for Stray Light in Log-ratio Diode Laser Absorption Measurements," *Applied Optics*, Vol. 53, No. 19, 2014, pp. 4128~4135.
- 9) Philippe, L. C. and Hanson, R. K., "Laser Diode Wavelength-modulation Spectroscopy for Simultaneous Measurement of Temperature, Pressure, and Velocity in Shock-heated Oxygen Flows," *Applied Optics*, Vol. 32, No. 30, 1993, pp. 6090~6103.
- 10) Hanson, R. K., Spearrin, R. M. and Goldenstein, C. S., *Spectroscopy and Optical Diagnostics for Gases*, 1<sup>st</sup> Ed., Springer, NewYork, 2015, pp. 131~141.
- 11) Ritter, K. J. and Wilkerson T. D., "High-Resolution Spectroscopy of the Oxygen A Band," *Journal of Molecular Spectroscopy*, Vol. 121, No. 1, 1987, pp. 1~19.
- 12) Brown, L. R. and Plymate, C., "Experimental Line Parameters of the Oxygen A Band at 760 nm," *Journal of Molecular Spectroscopy*, Vol. 199, No. 2, 2000, pp. 166~179.
- 13) Weldon, V., O'Gorman, J., Pérez-Camacho, J. J., McDonald, D., Hegarty, J., Connolly, J. C., Morris, N. A., Martinelli, R. U. and Abeles, J. H., "Laser Diode Based Oxygen Sensing: A Comparison of VCSEL and DFB Laser Diodes Emitting in the 762 nm region," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 38, No. 6, 1997, pp. 325~329.
- 14) "100 dB Range Logarithmic Converter AD8305 Data Sheet," Analog Devices, Inc., 2017.