

TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)를 이용한 차량용 필터 탈취 성능 측정 기술 개발

홍 정 웅¹⁾ · 박 성 민¹⁾ · 도 덕 희²⁾ · 전 민 규^{*2)}

한국해양대학교 냉동공조공학과¹⁾ · 한국해양대학교 기계공학부²⁾

Development of Vehicle Filter Deodorization Performance Measurement Technology Using TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)

Jeong-Woong Hong¹⁾ · Sung-Min Park¹⁾ · Deog-Hee Doh²⁾ · Min-Gyu Jeon^{*2)}

¹⁾Division of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

²⁾Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received 6 August 2020 / Revised 16 September 2020 / Accepted 13 October 2020)

Abstract : International emission issues make it essential to develop emission reduction devices and to have accurate measurement technology. It became possible to measure the concentration of the target gas using the tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) technique. This study tested the ammonia gas measurement technology using TDLAS in order to compare the filter deodorization performance of each vehicle. The measurement results were compared with the existing gas detection method(KS I 2218). As a result of comparing the filtering performance, the TDLAS result showed less performance than the conventional detection method. Furthermore, the diatomite filters were excellent, with over 65.3 % in ammonia 100 ppm than the activated carbon filters to deodorization performance. Accordingly, the effectiveness of the deodorization performance measurement technique using TDLAS can be verified.

Key words : Tunable diode laser absorption spectroscopy(레이저흡수분광법), Concentration measurement(농도 측정), Automotive air filter(자동차 에어 필터), Filter deodorization performance measurement(필터 탈취 성능 측정), Ammonia(암모니아)

1. 서 론

국제적으로 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)에서 촉발되는 환경오염 문제가 이슈화되고 있으며 국제 표준 배출가스 시험방식(Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, WLTP)과 같은 강력한 규제와 유엔 산하 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 황산화물 함유량 규제 정책 등을 통해 배기가스 배출에 관한 강력한 규제가 실시되고 있다.

이에 따라 많은 산업에서 배기가스를 줄이기 위한 저감 장치의 연구 개발 및 적용이 진행 되고 있으며 자동차 산업에서는 차량에서 배출되는 오염물질을 줄이기 위한 방법으로 배기가스 재순환 장치(Exhaust Gas Recirculation,

EGR), 디젤 미립자 필터(Diesel Particulate Filter, DPF) 그리고 선택적 촉매 환원법(Selective Catalyst Reduction, SCR) 등과 같은 배기가스를 저감시키는 부품들이 개발되었으며, 수소, 전기를 이용한 친환경 연료 등을 통한 무탄소 자동차의 개발 노력이 이뤄지고 있다.

이와 더불어 대기 중에서 차량 내부로 유입되는 유해 가스를 제거하기 위한 차량용 필터 시장의 성장률이 매년 높아지고 있으며, 공조를 이용한 냄새저감, 항균 기능 필터¹⁾ 등 다양한 소재를 사용한 필터의 개발이 진행되고 있다. 하지만 현재 차량용 필터 성능을 과장되게 표기하는 문제가 대두되고 있으며, 실제 필터 성능에 대한 소비자들의 의구심이 증가되고 있다. 이러한 원인은 실제 필터

*Corresponding author, E-mail: jeon85@kmou.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

의 성능이 문제일 수도 있으나, 필터의 성능을 정확하게 측정할 수 있는 방법의 부재로 인해 발생한 문제일 수도 있다. 현재 필터의 탈취 성능 측정방법으로 가스 검지관식 측정법(KS I 2218)이 적용되고 있다. 이 방법은 밀폐된 공간에 필터를 넣은 뒤 일정한 양의 가스를 주입, 일정 시간이 지나면 밀폐된 공간 안에 남아 있는 잔존 가스 농도를 측정함으로써 필터의 탈취성능을 평가한다. 하지만 이는 가스의 유동 패턴이 없는 상황에서 실험되기 때문에 공기의 흐름이 존재하는 필터의 실사용 환경과 맞지 않으며, 저 농도에서는 정확한 성능을 측정하는 데 문제가 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 상기 문제를 해결하고자, 유동 패턴이 있는 상황에서 탈취 성능을 평가할 수 있는 측정 방법으로 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법인 TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 기술을 적용하고자 한다. 이 기술은 가스 분자마다 고유의 특정 파장대에서 상대적으로 강한 에너지 흡수 반응을 광학식으로 측정하는 레이저 응용 계측법으로써, 700 nm에서 3,000 nm 사이의 파장인 근적외선 파장대역을 계측하며 다이오드 레이저를 사용하여 온도와 전류의 세기를 변화시킴으로써 측정 파장과 세기를 직접 조절할 수 있다. 해당 기술은 적은 유지보수 비용과 빠른 응답성을 가진 비접촉식 측정이라는 장점이 있으며, TDLAS를 이용한 선행연구를 살펴보면 자동차 엔진의 배기가스 측정,²⁾ 2차원 토모그래피를 이용한 가스의 온도 분포 측정,³⁾ 3차원 토모그래피를 이용한 가스의 온도 분포 측정,^{4,5)} CO 농도를 측정을 통한 연소 반응 현상 이해⁶⁾ 등과 같은 연소 반응에 관한 연구들이 있다.

본 연구의 목표는 다음과 같다. 먼저, TDLAS 기술을 이용한 새로운 필터 성능 측정 방법을 제시하여 기존 가스 검지관식 측정법과 비교를 하고자 한다. 상대비교를 위해 기존 측정방법에서 사용하는 악취 발생 가스 중 암모니아(NH₃) 가스를 측정매체⁷⁾로 선정하였다. 암모니아 가스는 1,512 nm 파장대역에서 대표적 흡수 반응이 나타나기 때문에 해당 파장대역을 설정하여 실험을 진행하였다. 그리고 실제 필터 소재에 따른 탈취 성능 비교를 증명한다. 현재 차량용 에어필터 소재로 많이 사용되고 있는 활성탄 함유 필터와 구조도가 함유되어진 필터 총 2가지 종류의 필터를 사용하여 탈취성능 비교 실험을 진행하고자 한다.

2. 이론 및 실험 설계

2.1 측정 이론

2.1.1 Lambert Beer's Law

TDLAS를 이용한 가스 농도 측정 방법은 가스 분자들은 각각 고유의 흡수 파장 영역대를 가지고 있으며, 레이저 빔이 측정 가스를 투과할 때 흡수된 레이저 강도비의 변화를 통해 측정할 수 있는데 이는 Lambert Beer 법칙⁸⁾을 기반으로 설명되며, 식은 다음과 같다.

$$\frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-A) \quad (1)$$

식 (1)은 빛 에너지가 매질을 통과하기 전과 후의 강도인 입사광 $I_0(\lambda)$ 과 투과광 $I_t(\lambda)$ 의 비로 흡광도 A 의 지수함수 형태로 표현할 수 있다.

$$A = -n \cdot \alpha \cdot L = -P \cdot L \cdot n \cdot S(T) \cdot G \quad (2)$$

여기서 흡광도 A 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있는데 n 은 측정 가스의 수밀도, α 는 흡수계수를 나타내며 L 은 매질의 두께이다. 매질의 두께는 빛 에너지가 가스 매질을 통과하는 길이로 흡광도는 흡수계수와 길이에 비례한다. 또한 P 는 압력, $S(T)$ 는 T 온도에서의 측정가스의 선강도, G 는 흡수영역의 선형함수이며 Voigt 프로파일 이 적용되어 근사화 하였다. 최종적으로 측정 가스의 농도는 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$n = \frac{A}{P \cdot S(T) \cdot L} \quad (3)$$

2.1.2 Voigt 선폭선형 함수

정확한 농도 계측을 위해서는 선형함수의 선폭확장 해석이 중요하다. 레이저에 의해 가스분자의 흡수반응이 나타날 때, 스펙트럼의 선폭확장은 선형 함수(Line shape function)의 형태로 나타난다. 선형함수식은 분광학적 흡수계수에 대한 상대적 변화를 반영하여 주파수에 대한 선형함수의 적분된 값을 1로 표준화시키면 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 도플러 선폭확장(Doppler broadening)과 분자상호간 충돌에 의한 선폭확장(Collisional broadening)의 영향을 모두 고려한 모델인 Voigt 선형함수를 이용하였다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} Gdv = 1 \quad (4)$$

2.1.3 흡수선 데이터 처리

Fig. 1은 TDLAS를 이용하여 측정한 흡수선 스펙트럼 분해 전 그래프를 보인다. 본 연구에서는 직접 흡수 분광법(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)^{9,10}을 이용하여 흡수가 일어난 스펙트럼과 흡수가 일어나지 않은 스펙트럼을 상대 비교하여 흡수선을 구한다.

Fig. 2는 Fig. 1을 이용하여 계산한 흡수 스펙트럼 그래프 예시이다. 흡수가 일어나지 않았을 때의 선인 Base line(I_0)과 흡수가 일어난 선인 Absorption line(I_1)의 비를 통해 흡수 스펙트럼을 계산한다.

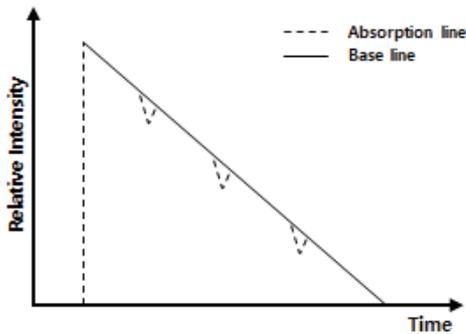


Fig. 1 An example of absorption line and the baseline fit

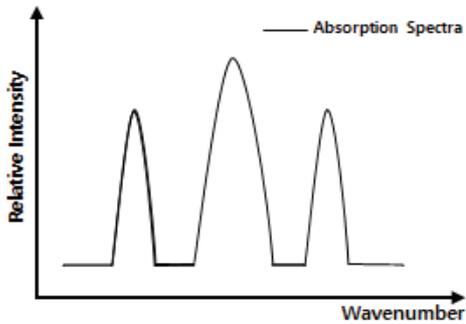


Fig. 2 An example of absorption spectra

2.2 흡수선 파장의 선정 및 이론적 검증

Fig. 3은 HITRAN 2008 database¹¹⁾에서 제공하는 정보를 사용하여 1,512 nm 파장대역에서의 암모니아와 H₂O 가스의 흡수파장을 보인다. 본 연구는 필터 실사용 조건에서의 암모니아 농도만을 측정해야 함으로 해당 파장대역에서 H₂O 등의 대기 성분으로부터의 흡수 간섭이 존재하지 않음을 확인하여야 한다.

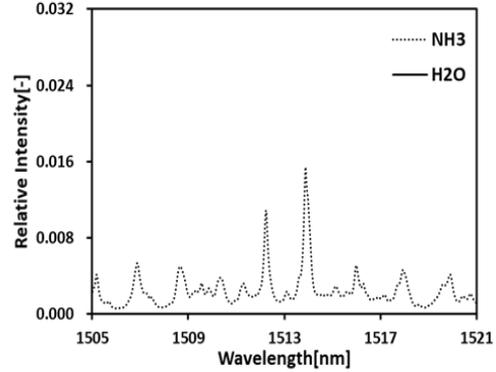


Fig. 3 The relative intensity of theoretical NH₃ and H₂O absorption spectra (1,505 nm~1,521 nm)

2.3 광학식 농도 측정 방법

다음 Fig. 4는 차량용 필터의 탈취 성능을 측정하기 위한 측정 셀 형상이다. 측정 셀 중심부에 차량용 필터가 장착되며 농도 측정을 위한 거리 L 은 100 mm이다.

Fig. 5는 측정 셀을 이용하여 필터 성능 측정을 위한 실험의 구성을 보인다. 이는 크게 레이저 신호(Laser signal)를 위한 장치와 가스 흐름(Gas flow)을 위한 장치로 나눌 수 있다.

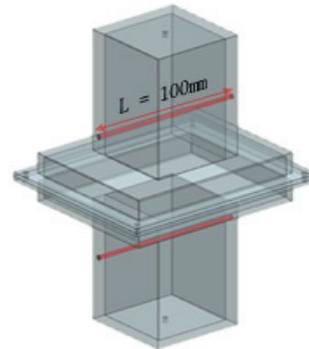


Fig. 4 Measuring cell

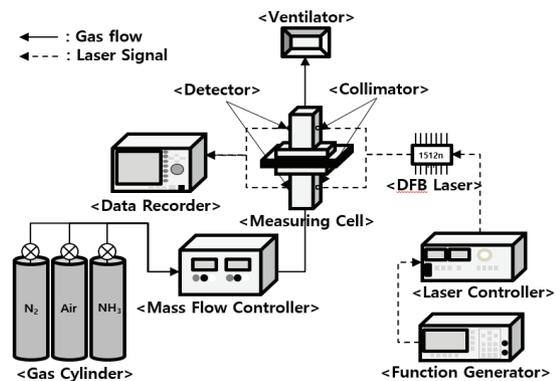


Fig. 5 Experimental setup

먼저 레이저 신호처리 과정을 살펴보면 1,512 nm 파장 영역의 암모니아 흡수 스펙트럼을 측정하기 위해 분포 귀환형 반도체 레이저(DFB, Distributed Feedback laser)를 사용하였다. 레이저 발생 파형은 함수발생기(Function generator)를 통해 1 kHz로 주기로 톱니파형을 생성한다. 발생된 파형은 레이저 컨트롤러(Laser controller)에서 일정한 온도와 전류 값의 레이저로 발진하여 시준기(Collimator)를 통해 측정 셀 전달, 후단 총 2개의 영역으로 분배된다. 분배된 레이저 신호는 검출기(Detector)를

통해 데이터 레코더(Data recorder)로 전달된다. 전달 신호는 2 μs마다 1개씩 데이터를 샘플링 하였으며, 총 100 ms 동안 100개의 파형을 관측하여 평균값을 이용하여 농도 계산을 실시하였다.

가스 흐름은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 1,000 sccm(Standard Cubic Centimeter per Minute)로 일정하게 가스 유량을 제어하였다. 실험은 고순도 공기와 1% 암모니아를 예혼합하여 100 PPM, 150 PPM, 200 PPM, 250 PPM 농도의 암모니아 가스를 만들어 진행하였다. 실험 장비별 상세 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of experimental equipment

Equipment	Specifications	
DFB Laser	Company	Eblana photonics
	Model	EP1512-2-DM-B01-FA
	Detail	Laser diode current : 120 mA Operating Temp : 0 ~ 50 °C Peak wavelength : 1,512.20 nm SMSR : 43.94 dB
Function generator	Company	EZTMI
	Model	DDF-3010
	Detail	Frequency : 1 μHz ~ 1 MHz Amplitude : 50 mVpp ~ 20 VPP DC offset : ±10 V
Laser controller	Company	Newport
	Model	LDC-3724C-220V
	Detail	Power : 220 V ± 10 % Temp : 0 ~ 40 °C
Collimator	Company	Thorlabs
	Model	50-1550A-APC
	Detail	Clear aperture : ≥ φ 1.8 mm Optical power : 300 mW(max) FC/APC Connector
Photodiode	Company	Hamamatsu photonics
	Model	G8370-01
	Detail	Photosensitive area : φ 1.0 mm Response range : 0.9 ~ 1.7 μm Peak sensitivity : 1.55 μm
Data recorder	Company	Hioki
	Model	8861-50 memory hicorder
	Detail	Number of channel : 16 Sample rate : 20 MS/second
Mass flow controller	Company	Sehwa hightech
	Model	3660-1/4LOK-1000sccm-o
	Detail	Flow : 1,000 sccm Response : 2 sec Operating pressure : < 3 bar

3. 실험 및 결과

3.1 Base line 선정 테스트

실험 전 base line 선정을 위해 대기 조건, 암모니아, 질소 가스를 이용하여 DFB 레이저의 흡수반응 실험을 진행하였다. base line 선정은 3차 다항식을 통한 알고리즘 계산을 통해 계산도 가능하다. 본 실험에서는 실제 환경과 유사한 조건에서 실제 성능 측정을 위해 실험을 통한 base line 선정을 진행하였다. Fig. 6은 실험을 통해 확인한 흡수선 데이터 실험 결과로 암모니아 가스에서만 흡수 반응이 나타났으며, 대기 조건과 질소 가스에서는 흡수 반응이 없음을 확인하였다. 이를 근거로 실제 필터 사용 환경조건에 맞도록 대기 조건을 Base line으로 선정하였다.

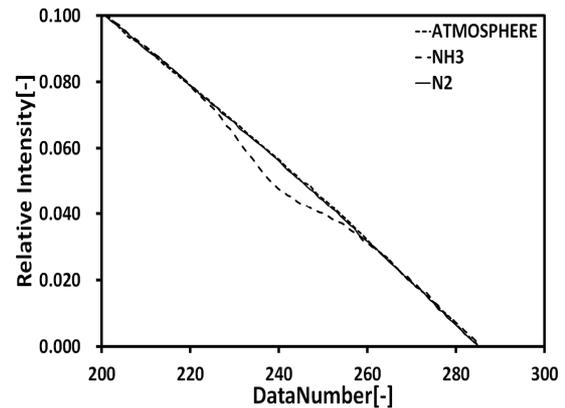


Fig. 6 Absorbing gas test

3.2 NH₃ 농도 캘리브레이션

Fig. 7은 HITRAN 2008 database를 이용하여 계산한 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm 농도에서 암모니아 가스의 흡수 스펙트럼이다. 3개의 대표점 #1(1,513.88 nm), #2(1,515.98 nm), #3(1,517.93 nm)을 이용하여 실험데이터와 흡수 파장 영역 피팅을 실시하여 흡수 영역에 대한 파장대역을 계산하였으며, 각각의 ppm 농도별 암모니아 가스

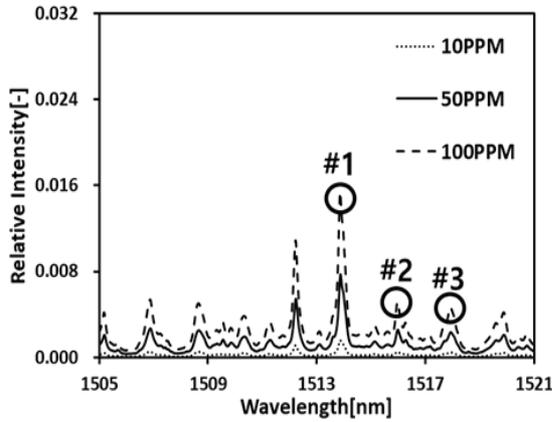


Fig. 7 NH₃ absorption spectra by ppm

스펙트럼의 흡수 강도를 계산하였다.

암모니아 가스 농도는 MFC를 이용하여 조절하였으며, 조절 값은 다음 Table 2와 같다.

실험 결과 최대 흡수 지점인 #1(1,513.88 nm)에서의 ppm 농도별 Relative intensity 결과 값이 Fig. 8에 보인다.

Table 2 Experimental conditions

Experimental case	PPM	Air	NH ₃ (1 %)
Case 1	10	999	1
Case 2	20	998	2
Case 3	30	997	3
Case 4	40	996	4
Case 5	50	995	5
Case 6	60	994	6
Case 7	70	993	7
Case 8	80	992	8
Case 9	90	991	9
Case 10	100	990	10

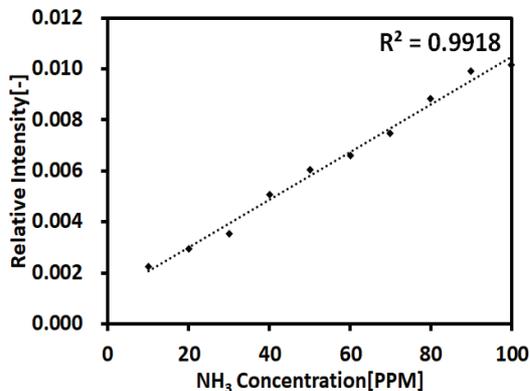


Fig. 8 Comparisons between the concentration measured by TDLAS (#1, 10 to 100 ppm)

암모니아 가스의 농도가 증가함에 따라 Relative intensity 값이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, 선형식의 회귀계수 값인 R² 이 0.9918로 1에 근사한 결과를 보여주었다. 하지만 HITRAN 2008 database 결과와 캘리브레이션 실험의 농도별 Relative intensity 값에는 차이가 있었는데, 이는 실험 환경 및 사용 장비에 따른 차이로 본 연구에서는 농도 측정 캘리브레이션 데이터를 사용하여 필터 성능 측정을 진행하였다.

3.3 차량용 필터 NH₃ 가스 탈취 성능 측정

다음 Fig. 9는 각각 규조토 필터와 활성탄 필터의 암모니아 가스 100 ppm, 150 ppm, 200 ppm, 250 ppm 농도에서 실험한 결과이다. 두 개의 필터 모두 암모니아 가스의 ppm 농도가 커짐에 따라 필터 전단의 Intensity 값이 선형적으로 증가하였으며, 암모니아 가스가 필터를 통과한 후단의 Intensity 값의 감소 비율은 농도가 커짐에 따라 감소 비율이 작아짐이 확인되었다.

상용 측정 방법(가스검지관식, FITI시험연구원)을 이용한 규조토 필터의 측정 결과는 99.8 % 이상의 탈취 성능을 보였다. 하지만 본 연구결과에서 검증하고자 하는 TDLAS 방식에서 규조토 필터의 경우 암모니아 100 ppm에 대해서는 84.8 %, 활성탄 필터의 경우 19.5 % 탈취 성능을 보였다. 이 결과로부터 규조토 필터가 활성탄 필터보다 탈취 성능을 보임을 확인할 수 있다.

암모니아 150 ppm 이상부터 규조토 필터, 활성탄 필터 모두가 50 % 이하의 탈취 성능을 보임으로 고농도에서는 재 성능을 보이지 않음을 알 수 있다.

그리고 Table 3은 규조토 필터와 활성탄 필터의 탈취 전후 측정데이터이다. 성능을 비교한 결과로 규조토 필터의 탈취 성능이 암모니아가 100 ppm일 경우 65.3 % 좋게 나타났으며, 농도가 커짐에 따라 필터 성능이 현격하게 떨어짐이 나타났다.

Fig. 10은 규조토 필터와 활성탄 필터를 적용하였을 때 암모니아가스의 탈취율을 보인다.

Table 3 Comparison diatomite and active carbon filter deodorization performance

PPM	Diatomite filter		Active carbon filter	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
100	0.0078	0.0012	0.0064	0.0051
150	0.0122	0.0063	0.0120	0.0102
200	0.0171	0.0123	0.0181	0.0167
250	0.0212	0.0167	0.0233	0.0227

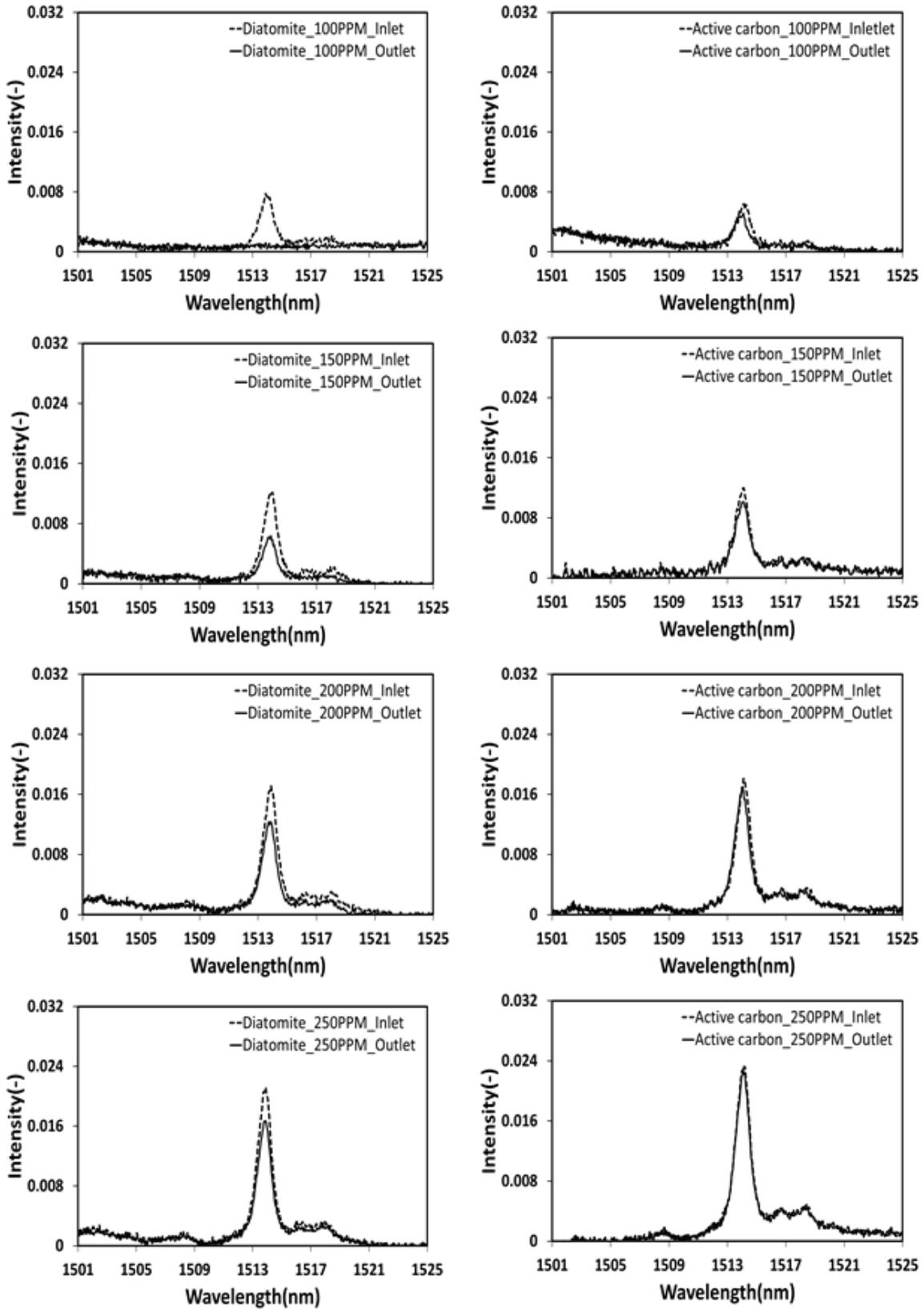


Fig. 9 Diatomite and active carbon filter experimental results by concentration

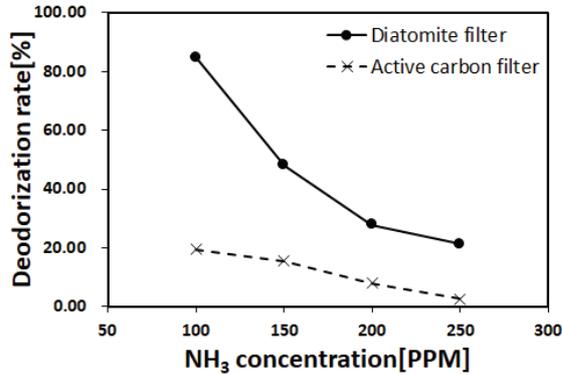


Fig. 10 Performance comparison of deodorization rate

4. 결론

TDLAS를 이용한 차량용 필터 탈취 성능 기술 개발 내용은 다음과 같다.

- 1) 캘리브레이션 실험 결과 #1(1,513.88 nm)에서 농도별 Intensity 증가가 선형성을 보였으며, 회귀식의 결정계수 r^2 값이 0.9918로 농도 측정 방법의 적합성을 확인할 수 있었다.
- 2) 규조토 필터와 활성탄 필터에 대해 TDLAS를 이용한 탈취 성능 결과가 기존 탈취 성능 평가 방법인 가스 검지관식 측정법에 비해 모두 필터 성능이 낮게 나타났다. 이는 실제 필터 사용 환경과 유사하게 유동 패턴이 있는 실험을 실시하여 보다 악조건의 시험법임을 보인다. 그럼에도 불구하고 암모니아 농도 변화에 따라 Intensity 값이 선형적으로 변하는 경향성을 확인할 수 있었다.
- 3) 규조토 필터와 활성탄 필터의 성능 비교 결과, 이론적으로 활성탄 대비 다공성 형상이 더 많은 규조토 필터에서 더 좋은 탈취 성능이 나타남을 확인할 수 있었다. 특히, 암모니아가 100 ppm일 경우 규조토 필터의 성능이 활성탄 필터 대비 65.3% 우수했다.
- 4) 결론 1)~3)의 결과를 토대로, TDLAS를 이용한 필터의 탈취 성능 측정 기술의 타당성을 확인해 볼 수 있었으며, 향후 배기가스 측정 기술 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 한국연구재단의 창의도전연구과제(No. 2020R111A1A01052771)의 지원에 의하여 수행되었으며, 2019년 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KIET) 연구비 지원에 의한 연구(No.20005750)임.

References

- 1) W. M. Choi and C. H. Lee, "Development of Multifunctional Cabin Air Filter for Reducing HVAC Odor," KSAE Spring Conference Proceedings, 2017.
- 2) M. Yamakage, S. Fukada, T. Iwase, T. Yoshida, K. Muta and Y. Deguchi "Development of Direct and Fast Response Gas Measurement," SAE 2008-01-0758, 2008.
- 3) M. G. Jeon, D. H. Doh and Y. Deguchi, "Measurement Enhancement on Two-Dimensional Temperature Distribution of Methane-Air Premixed Flame Using SMART Algorithm in CT-TDLAS," Applied Sciences, Vol.9, No.22, 4955, 2019
- 4) D. I. Yoon, J. H. Kim, M. G. Jeon, D. W. Choi, G. R. Cho and D. H. Doh, "Calculating of 3-Dimensional Temperature Distribution for High-Temperature Exhaust gas Using CT-TDLAS," Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol.29, No.1, pp.97-104, 2018.
- 5) M. G. Jeon, D. H. Doh and Y. Deguchi "Evaluation of 3D Measurement Using CT-TDLAS," Modern Physics Letters B, Vol.33, No.14&15, Paper No. 1940018-1-5, 2019.
- 6) S. H. So, D. G. Park, J. Y. Park, A. R. Song, N. K. Jeong, M. Y. Yoo, J. H. Hwang and C. Y. Lee, "An Experimental Study on Real Time CO Concentration Measurement of Combustion Gas in LPG/Air Flame Using TDLAS," Clean Technol, Vol.25, No.4, pp.316-323, 2019.
- 7) Y. Li, J. J. Schwab and K. L. Demerjian, "Measurements of Ambient Ammonia Using a Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer: Characteristics of Ambient Ammonia Emissions in an Urban Area of New York City," Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol.111, No.D10, 2006.
- 8) D. F. Swinehart, "Beer-Lambert Law," Journal of Chemical Education, Vol.39, No.7, p.333, 1962.
- 9) M. C. Shin, D. H. Kim and S. W. Kim, "Diode-Laser Absorption Sensors for Measurement of Combustion Gas," Journal of The Korean Society of Combustion, Vol.11, No.3, pp.26-35, 2006.
- 10) J. Zhu, A. Cowie, A. Kosterev and D. Wyatt, "Advantages of Using Direct Absorption Method for TDLAS Measurement," Proceeding of the Annual ISA Analysis Division Symposium, Vol.503 pp.385-396, 2014.
- 11) L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. Chris Benner, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, J. P. Champion, K. Chance,

L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, S. Fally, J. M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W. J. Lafferty, J. Y. Mandin, S. T. Massie, S. N. Mikhailenko, C. E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C. P. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckova, M.

A. H. Smith, K. Sung, S. A. Tashkun, J. Tennyson, R. A. Toth, A. C. Vandaele and J. Vander Auwera, "The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.110, Nos.9-10, pp.533-572, 2009.