

# 연소 배관 유동장의 실시간 온도, 농도 측정에 관한 연구

홍정웅\* · 윤성환\*\* · 전민규†

## A Study on the Real-Time Temperature and Concentration Measurement of Combustion Pipe Flow Field

Jeong Woong Hong\*, Sung Hwan Yoon\*\* and Min Gyu Jeon†

**Abstract** Pipe failure due to thermal fatigue and environmental regulations are increasing the importance of pipe monitoring systems in industrial plants. Since most pipe monitoring systems are focus on external crack inspected, it is necessary to temperature and concentration measuring monitoring system inside the pipe. These systems have spatial uncertainty due to sample inspection by one-point measurement. In addition, real-time measurement is not possible due to the limitation of time delay due to contact measurement. In this study, CT-TDLAS (Computed tomography-Tunable diode laser absorption spectroscopy) apply to overcome the limitations of existing methods. Lasers exhibiting an absorption response at a wavelength of 1395 nm were arranged in a lattice pattern on measuring cell. It showed that the inside of the pipe changed to an unstable combustion state over time.

**Key Words :** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(가변 다이오드 흡수 분광법), Computed Tomography(컴퓨터 단층촬영법), Temperature Distribution(온도 분포), Concentration Distribution(농도 분포), Pipe Monitoring(배관 모니터링)

### 기호설명

$I_0(\lambda)$  : Incident light intensity  
 $I_t(\lambda)$  : Transmitted light intensity  
 $A$  : Absorbance

$n_i$  : Number of density  
 $L$  : Length of light path  
 $\alpha_i$  : Absorption coefficient  
 $S_{i,j}$  : Absorption line strength  
 $G_{vi,j}$  : Line broadening function

† Department of Mechanical Engineering, Republic of Korea Naval Academy, Assistant professor  
E-mail: eddygood@hanmail.net

\* Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Ph.D student

\*\* Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Associate professor

### 1. 서론

산업 시스템 및 플랜트 시설의 고도화에 따라 이를 능동적으로 감시하기 위한 센서 장치의 설치 및 필요성이 증가하고 있다. 이에 따라 오일 및 가스의 운송용 파이프 배관, 스팀 증기 및 정유 공정을 위한 고온용 파이프 배관 그리

고 오염 물질 처리 및 배기가스 배출 배관의 감시 또한 중요해지고 있다.

배관 파손에 의한 가연성, 유독성 물질의 누출 사고는 매년 증가하고 있는데 이는 화재·폭발과 같은 대형 사고로 이어지고 있으며 고온 연소 반응에 의한 배관의 용접 부위나 곡관 부위 등의 열 피로로 인한 파손이 원인 중 하나로 배관 내부의 온도 관리가 중요한 요소로 확인되고 있는 상황이다.

또한 환경 규제가 강화됨에 따라 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 같은 대기오염물질의 배출 총량관리 및 오염물질별 농도 규제 실시에 따라 연소 효율을 높이기 위한 공정 정밀 제어가 요구되어 연소 상태를 진단하는 기술이 필요한 상황이다.

현재 배관 모니터링 시스템의 대부분은 배관의 설치 위치가 땅속에 매립되어 있거나 해저에 위치한 경우와 같이 배관 상태를 직접 점검하기 어렵기 때문에 광케이블 센서, 초음파 센서 등을 이용하여 배관 외부의 파손 상태를 점검하고 있다.<sup>(1)</sup> 기존 온도 및 농도 측정 방식의 기술들을 살펴보면 대부분 점 계측(point measurement) 방식으로 배관 내부 공간에 대한 온도 분포 및 농도 분포를 대표하기에는 정밀하지 못하다는 문제가 있으며, 샘플링을 통한 측정 방식으로 인한 시간 지연(Time-leg)이 발생하는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 기존 측정 기술의 한계를 해결하기 위해 레이저 기술 기반 측정 방법 중 흡수법(Laser Absorption Spectroscopy)을 이용하여 실험을 진행하였다. 흡수법은 레이저의 특정 파장에서 계측하고자 하는 분자의 흡수가 발생하는 특성을 이용한 측정법으로 다른 측정방법들인 여기법(Laser Induced Fluorescence), 산란법(Laser Scattering), 감쇄법(Laser Extinction)과 비교했을 때 교정(Calibration) 필요성이 없으며, 실시간 측정이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 DFB(Distributed Feedback) 레이저를 사용하여 주입 전류 및 설정 온도에 따라 파수(Wavenumber)의 변경 가능으로 계측 유연성을 가진 기술인 가변 다이오드 레이저 흡수 분광법인 TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 기술<sup>(2,3)</sup>을 적용하였다. 또한,

CT(Computed Tomography) 알고리즘을 도입하기 위해 다수의 레이저를 이용한 비침투식 방법으로 점 계측 방식의 한계를 해결하였다.

본 논문에서는 두 기술을 결합한 CT-TDLAS<sup>(4)</sup>을 이용하여 연구를 진행하였다. 배관 내부의 메탄-공기혼합 가스의 연소 화염에서 생성된 온도 및 농도 분포 측정을 위해 연소 생성물인 H<sub>2</sub>O의 흡수 반응이 나타나는 파장인 1395nm 대역의 레이저를 사용하여 시간 경과에 따라 측정 셀 내부를 2차원, 3차원 이미지로 재구성하였다. 이를 통해, 배관 내부에서 온도 및 농도 분포를 정밀하게 분석할 수 있는 모니터링 기술을 제시하고자 한다.

## 2. 측정 이론 및 실험 방법

### 2.1 측정 이론

Fig. 1은 DFB 레이저를 이용하여 연소 화염에서 생성된 H<sub>2</sub>O를 측정된 결과로 #1, #2 지점은 측정 대상 가스의 흡수반응으로 인해 레이저 신호 강도가 감소되는 것을 나타내고 있다. 측정된 레이저 신호는 직접흡수분광법인 DAS(Direct Absorption Spectroscopy) 방법을 통해 Lambert-Beer의 법칙<sup>(5)</sup>으로 나타낼 수 있다. 해당 법칙은 조사된 입사광의 강도(Incident light intensity)와 측정 가스 매체를 통과한 투과광의 강도(Transmitted light intensity)의 비를 식(1)로 나타낼 수 있다.

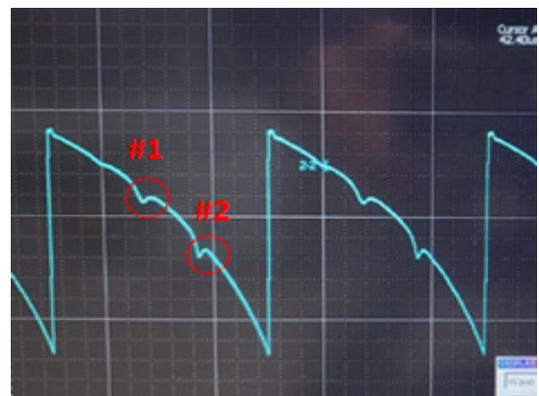


Fig. 1. Laser absorption signal

$$\begin{aligned}
 \frac{I_t(\lambda)}{I_0(\lambda)} &= \exp(-A) \\
 &= \exp\left\{-\sum_i (n_i \times L \times \alpha_i)\right\} \\
 &= \exp\left\{-\sum_i \left(n_i \times L \times \sum_j S_{i,j}(T) \times G_{vi,j}\right)\right\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)에서 흡광도(Absorbance)는 수밀도(Number of density)와 레이저 경로 길이(Length of light path), 흡수 계수(Absorption coefficient)에 영향을 받으며, 흡수 계수는 온도에 따른 흡수 선강도(Absorption line strength)와 선폭 확장 함수(Line broadening function)로 나타낼 수 있으며, 선폭 확장 함수의 파수 변화에 따른 흡수 적분 면적 계산을 통해 측정 농도는 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_i = \frac{A}{L \times S(T) \times \alpha} \tag{2}$$

선형함수 형태로 나타낼 수 있는 흡수 스펙트럼의 선폭은 온도, 압력의 변동으로 인해 발생하는 오차가 존재하기 때문에 불균일한 선폭 확장 모델인 도플러 선폭 확장(Doppler broadening)과 균일한 선폭 확장 모델인 충돌 선폭 확장(Collisional broadening)을 고려한 모델인 Voigt 선폭 확장을 사용하였다.

Fig. 2는 300K, 700K, 1000K 온도의 1395nm 파장 대역에서 온도에 따른 흡수 반응을 나타낸 스펙트럼으로 온도 증감에 따라 흡수 강도가 변하는 지점을 확인할 수 있다. 흡수 스펙트

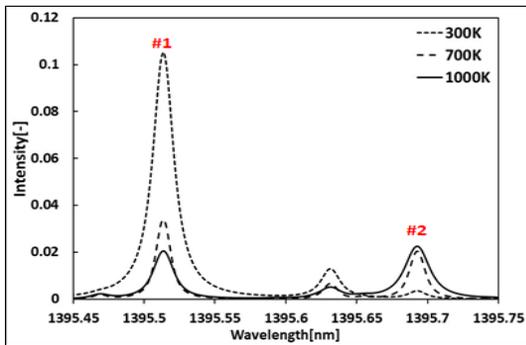


Fig. 2. Absorption spectrum

럼에서 흡수 반응이 나타난 피크 지점인 #1(1395.51nm)과 #2(1395.69nm)의 파장에서 토모그래피 알고리즘을 적용하여 온도, 농도 분포를 재구성하였다. 두 피크 지점에서의 온도에 따른 흡수 강도 변화는 Fig. 3과 같다. #1 지점은 온도 증가에 따라 강도(intensity)가 작아졌으며, #2 지점에서는 이와 반대로 강도가 강해지는 것을 확인할 수 있다.

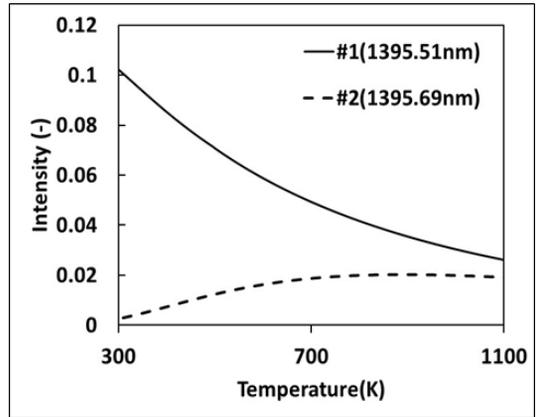


Fig. 3. Temperature dependence of two peak absorption ratio

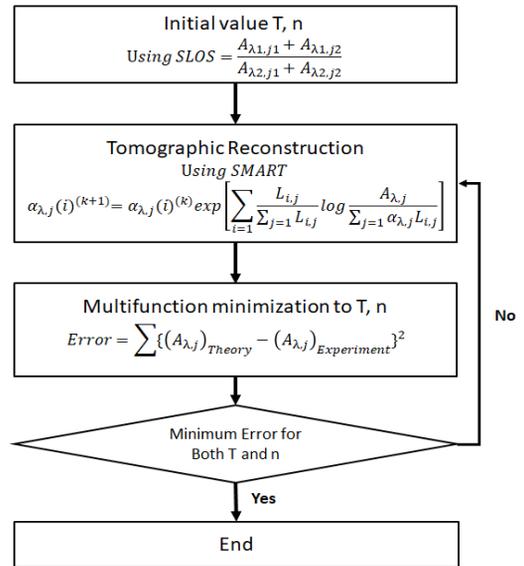


Fig. 4. The calculation process of temperature and concentration distribution in CT-TDLAS

Fig. 4는 CT-TDLAS를 이용하여 온도 및 농도 분포를 재구성하기 위한 프로세스이다. 교차하는 두 레이저( $j_1, j_2$ )의 피크 파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )을 초기 값 설정 알고리즘인 SLOS(Summation of Line of Sight) 알고리즘을 이용하여 계산한 뒤 SMART(Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 토모그래피 알고리즘을 적용하여 오차가 최소가 될 때까지 반복 계산을 진행하였다.

### 2.2 실험 방법

CT-TDLAS 실험 개략도는 Fig. 5와 같으며 실험 장치는 연소가스 흐름을 컨트롤하기 위한 장치 구성 부분과 레이저 발생을 위한 장치 구성 부분으로 구분할 수 있다. 가스 실린더로부터 공급된 가스들은 질량유량계(Mass Flow Controller)를 통해 메탄(0.1L/min), 공기(1L/min)로 일정하게 공급하다 메탄 공급을 중단시켰으며 배관 내부 분젠 버너(Bunsen burner)를 통해 혼합된 메탄-공기가스는 연소시켜 배관 출구 부분에서 시간 경과에 따라 온도 및 농도 변화를 측정하였다. 10 $\mu$ s마다 측정된 샘플링 데이터 500개를 통해 1개의 파장을 생성하여 5ms마다 온도 및 농도를 획득하도록 설정하여 실험을 진행하였다.

측정 셀(Measuring cell)은 연소 배관 출구부에 장착하여 온도 및 농도 측정하였으며, 셀의 직경은 90 mm이며, 측정 포인트 간 간격은

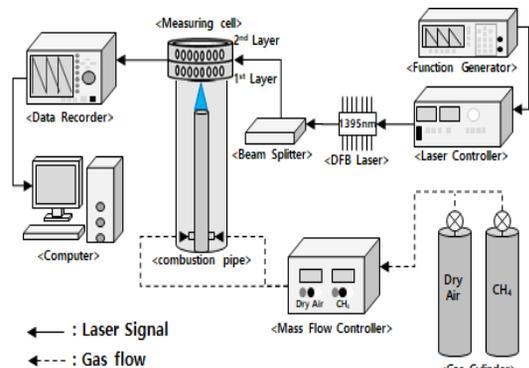


Fig. 5. Experimental setup

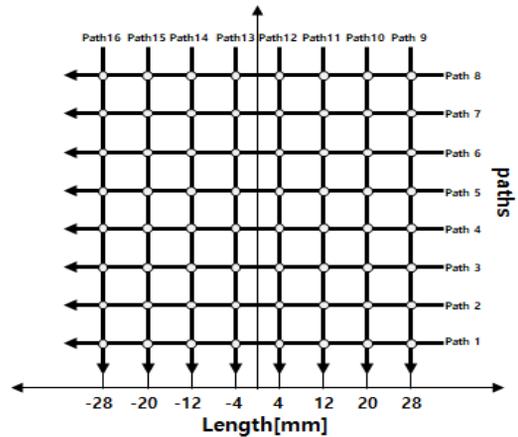


Fig. 6. 8x8 laser paths of measuring cell

8mm이다. 첫 번째 측정 셀(아래), 두 번째 측정 셀(위) 총 2개의 측정 셀을 사용하였으며, 측정 셀 간 간격은 15mm이다. Fig. 6과 같이 가로, 세로 각각 8개씩 레이저를 격자 형태로 배치하여 교차하여 발생하는 64개의 측정 포인트를 동시 측정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 Tomography 재구성 결과

Fig. 7은 배관 출구부에서 시간 경과에 따른 측정 셀에서의 화염 거동 변화와 각각의 측정 셀에서의 온도 및 농도 분포를 2차원(2-Dimension) 이미지로 나타낸 결과이다. 질량유량계를 통해 메탄-공기가 일정하게 공급된 1~4초까지는 연소 안정 상태를 보였지만, 5초 이후부터는 메탄 공급을 중단되면서 분젠 화염의 크기가 점점 작아지는 것을 측정 이미지를 통해 연소 불안정 상태를 확인할 수 있었다.

CT-TDLAS를 통해 계산된 온도 및 농도 분포 결과는 아래쪽에 위치한 첫 번째 측정 셀에서 온도 및 농도 분포가 더 크게 나타났다. 이는 위쪽에 위치한 두 번째 측정 셀에서 더 낮은 온도 및 농도 분포를 보여주었으며, 또한 연소 유동 및 배관 출구부의 영향으로 농도 분포가 +y 축 방향으로 이동한 것을 확인해 볼 수 있었다.

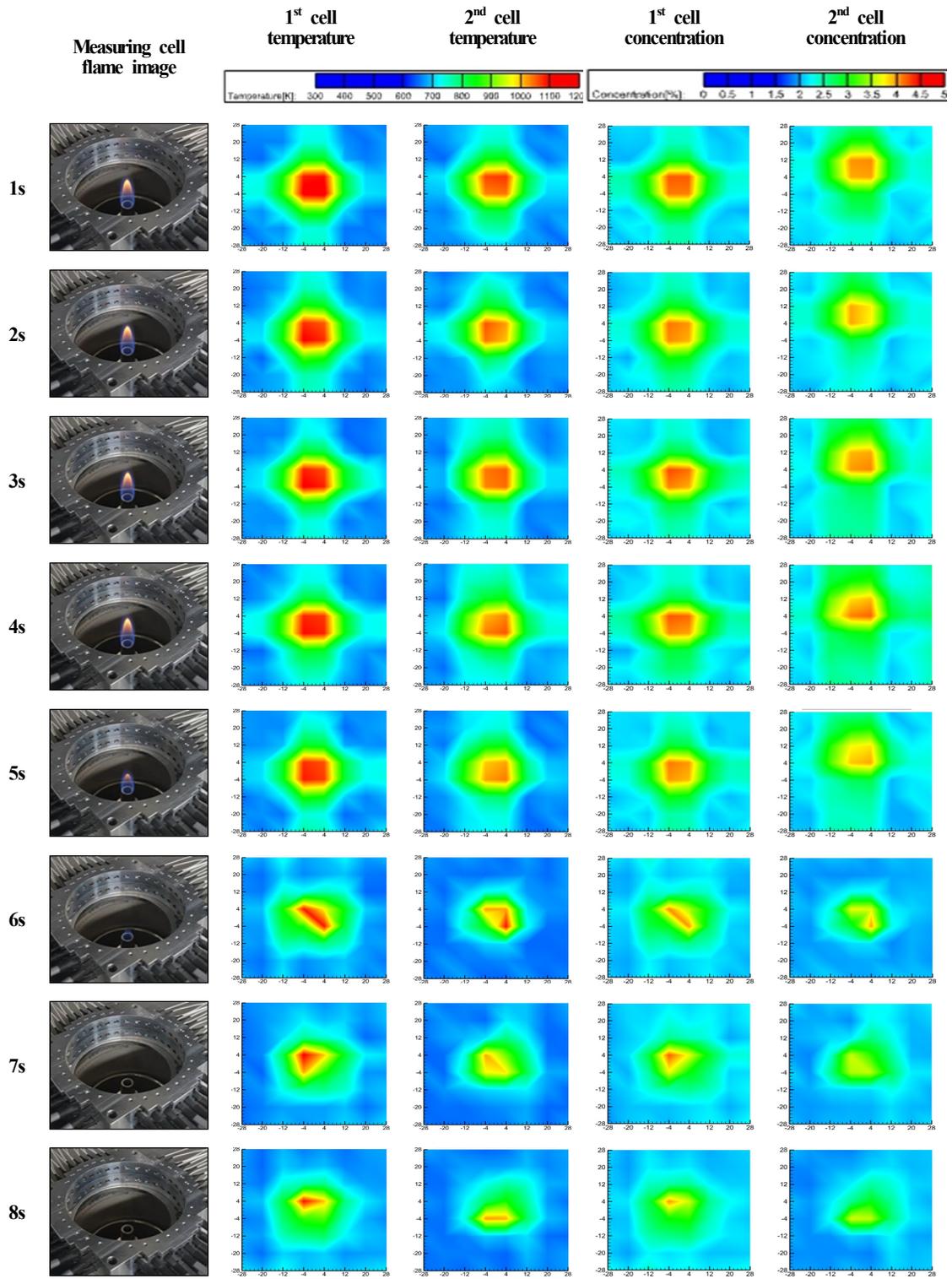
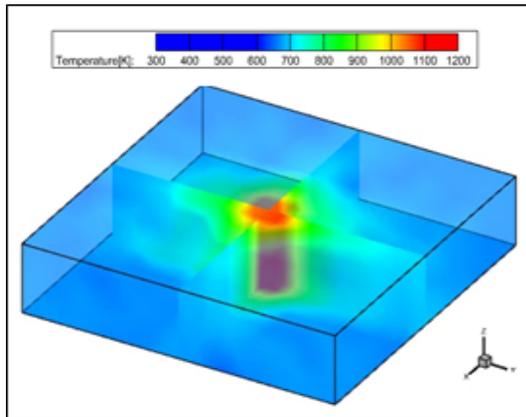
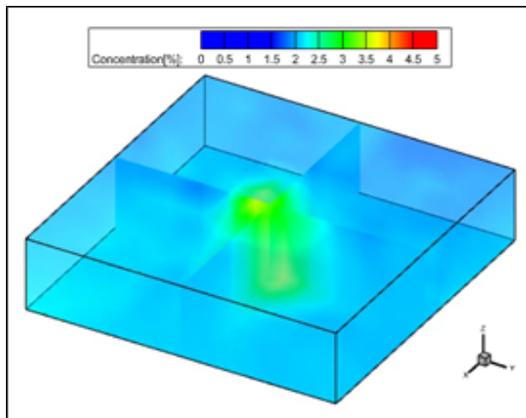


Fig. 7. 2-Dimension temperature and concentration distribution at 1st layer and 2nd layer



(a) 3-Dimension temperature distribution



(b) 3-Dimension concentration distribution

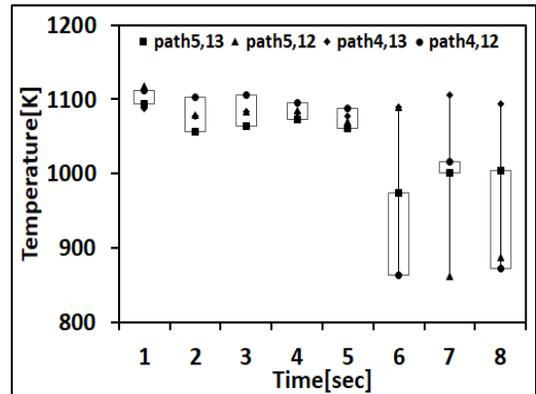
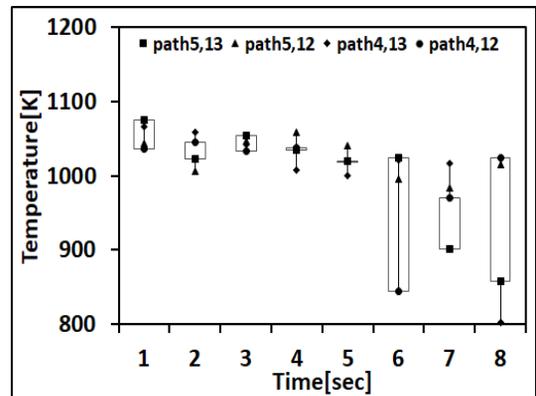
**Fig. 8.** The result of 3-Dimension temperature and concentration distribution

실험 결과를 통해 배관 출구부에서 모니터링 한 연소 상태는 연소 안정 상태일 때 비해 연소 불안정 상태일 때의 격자 위치별 온도 및 농도가 불안정하게 변하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 첫 번째 측정 셀과 두 번째 측정 셀의 2차원 온도 및 농도 분포 결과를 내삽(Interpolation) 하여, Fig. 8과 같이 3차원(3-Dimension)으로 내부 유동 변화를 확인해 볼 수 있었다.

### 3.2 고온부 온도 측정 결과

Fig. 9 (a),(b)는 첫 번째 측정 셀과 두 번째 측정 셀의 4개 격자 포인트 path 4, path 5, path 12, path 13의 온도 측정 결과를 나타내고 있다.

(a) The measured temperature at 1<sup>st</sup> layer(b) The measured temperature at 2<sup>nd</sup> layer**Fig. 9.** The measured temperature at 4-laser path (4,5,12,13)

각각의 격자 포인트에서 측정된 온도를 살펴보면 다음과 같다. 1초에서 5초까지의 온도 격차는 첫 번째 측정 셀은 약 34K, 두 번째 측정 셀은 약 41K로 나타났으며, 4개 격자 포인트에서 비슷한 결과를 보여주었다. 불안정 연소 상태인 6초 이후의 온도 격차는 첫 번째 측정 셀의 경우 약 231K, 두 번째 측정 셀의 경우 약 172K로 격자 포인트 간 온도 격차가 크게 증가한 것을 확인해 볼 수 있었다.

4개 격자 포인트에서 측정된 온도를 평균적으로 연소 중심부의 온도를 계산한 결과는 Fig. 10과 같다. 첫 번째 측정 셀과 두 번째 측정 셀의 온도는 시간 경과에 따라 증감이 비슷한 경향성을 보였으며, 측정 셀 간 온도 격차는 평균적으로 42K로 정도 차이 나는 것으로 나타났다.

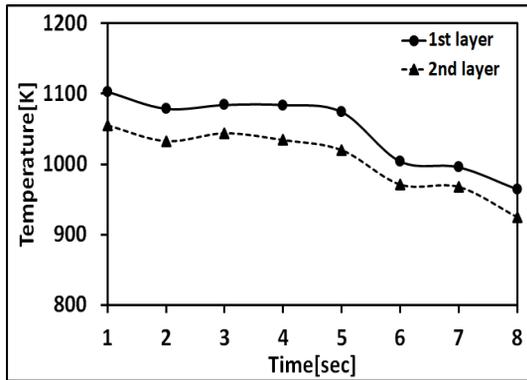


Fig. 10. The measured average temperature at 1<sup>st</sup> layer and 2<sup>nd</sup> layer

#### 4. 결론

연소 상태가 실시간으로 변하는 측정 셀 내부를 CT-TDLAS를 통해 온도 및 농도 측정을 진행하였으며, 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 다수의 레이저를 격자로 배치하여 온도 및 농도 분포를 2차원, 3차원 이미지로 확인할 수 있었다.
- 2) 실험 결과를 보면 연소 불안정 상태에서 측정 포인트에 따라 온도 격차가 크게 나타났다. 시간 변화에 따라 화염과 가까운 첫 번째 측정 셀에서 온도 격차가 최대 231K, 두 번째 층에서 172K 차이가 남을 확인하였다. 이는 기존 점 계측 측정 방식을 적용했을 때 관내 공간 전체 정보를 제공할 수 없음을 시사한다. 따라서 본 연구에서 제시한 CT-TDLAS 기술을 통해 해당 문제를 해결할 수 있을 것으로 보인다.
- 3) 하지만, 배관의 직경이 작은 경우, 공간적으로 배치할 수 있는 레이저 개수의 한계로 관내 정밀한 다차원 이미지 구성에 한계가 존재한다.
- 4) 본 연구 결과를 통해, 열 피로에 의한 배관의 취약 영역 감지 및 공정 상태(배기가스 배출량, 에너지 효율 등)를 정밀하게 진단할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 후 기

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R111A1A01052771).

#### REFERENCE

- 1) Bae, M. H., Park, J. H., Park, C. S., Choi, W. J., Ha, J. W. and Seung, H. M., 2021, "A Magnetostrictive patch Transducer System for Circumferential Monitoring of Water Supply Pipes", Vol41, No.3, pp172-182.
- 2) Park, J. Y., Kim, D. H., Ryu, C. K., Park, D. G. and Lee, C. Y., 2021, "An Analysis of Gas Concentration Transition in NO Oxidation Processes Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy", Journal of energy&climate change, Vol.16, No.2, pp.214-230.
- 3) Li, J., Zhang, C., Wei, Y., Du, Z., Sun, F., Ji, Y., Yang, X. and Liu, C., 2020, "In situ, portable and robust laser sensor for simultaneous measurement of ammonia, water vapor and temperature in denitrification processes of coal fired power plants", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol305, 127533.
- 4) Jeon, M. G., Hong, J. W., Doh, D. H. and Deguchi, Y., 2020, "A study on two-dimensional temperature and concentration distribution of propane-Air premixed flame using CT-TDLAS," Modern Physics Letters B, Vol. 34, 2040020-1-2040020-5
- 5) Swinehart, D. F., 1962, "beer-Lambert Law", Journal of chemical education, Vol.39, No.7, p.333.