

레이저흡수분광을 이용한 난류유동 배기가스 온도장 실시간 분석 연구

최 두 원[†]

신라대학교 배터리·자동차공학부

Real-time Analysis of Exhaust Gas Temperature Field in Turbulent Flow Using Laser Absorption Spectroscopy

Doo Won Choi[†]

Division of Battery & Automobile Engineering, Silla University, Busan 46958, Republic of Korea

Abstract This study presents a real-time method that uses Laser Absorption Spectroscopy (LAS) to measure exhaust gas temperatures in turbulent flow fields. It was possible to measure temperature by passing a laser beam through the exhaust gas in a grid pattern, and obtain a temperature distribution image through time series analysis at 0.1 second intervals. Temperature image resolution has been improved with CT reconstruction algorithms. Estimating maximum temperature values and locations enabled 2D temperature analysis, surpassing single-point methods like thermocouples. The accuracy of LAS measurements was evaluated by comparison with thermocouple measurements. This approach will contribute to automotive technology and environmental protection by providing reliable temperature data for interpreting turbulent temperature distributions.

(Received January 24, 2024; Revised March 18, 2024; Accepted March 22, 2024)

Key words : Laser Absorption Spectroscopy, Computed tomography, Temperature field, Exhaust gas, turbulent flow

1. 서 론

현대의 자동차 산업은 엄격한 환경규제와 함께 친환경적이며 지속 가능한 기술 발전에 대한 요구에 직면하고 있다. 특히, 과도한 배기가스 배출은 대기 오염과 온실가스 배출의 주요 원인으로 지목되어 왔다. 이에 따라 자동차 제조업체들은 배기가스 처리 시스템의 효율을 향상시키고 배기가스의 온도를 효과적으로 관리하는 기술을 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 또한, 배기가스 온도는 엔진의 효율과 밀접한 관련이 있으며, 엔진의 정상 작동 여부를 판단하는 데 중요한 지표 중 하나이다. 배기가스 온도가 너무 높거나 낮으면 엔진의 성능에 문제가 있을 수 있으므로 지속적인 온도 모니터링이 필수적이다. 특히 환경에 대한 관심과 요구가 높아지면서 배기가스 분석을 위해 온도 측정에 관한 다양한 연구

들이 진행되어왔다[1-6]. 그러나, 대부분의 온도 측정 방법은 단일지점 측정 방식인 열전대를 이용한 측정법이 사용되어왔으며, 배기가스와 같이 예측하기 어려운 난류 유동장에서는 측정온도의 신뢰도에 한계가 있다. 따라서 다중 지점을 동시에 측정할 수 있고, 지연 시간 없이 고속 측정이 가능한 방법이 필요하다. 이를 해결하기 위한 측정 방법으로는 다중 레이저를 이용한 LAS(Laser Absorption Spectroscopy) 기술이 있다[7-8]. LAS는 조정 가능한 다이오드 레이저를 사용하여 특정 분자의 흡수선을 분석하여 온도를 측정하는 분광학적 측정 기술이다. 이 기술은 고온 및 고압 환경에서도 높은 정확도와 신속한 응답 속도를 제공하여, 대기 환경 모니터링, 산업 프로세스 제어, 화염 감지 등의 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 난류 유동의 배기가스를 대상으로 실시간 온도장 분석을 위해 LAS 기술을 적

[†]Corresponding author. E-mail : dchoi@silla.ac.kr

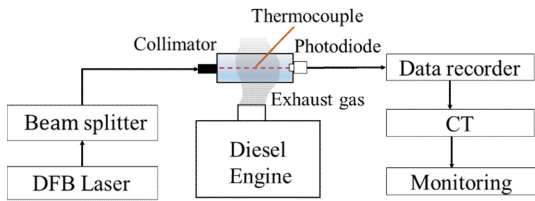


Fig. 1. The Schematic LAS system and data acquisition system.

용하고자 한다. CT(Computed Tomography) 알고리즘을 이용하여 배기가스의 온도 변화 상태를 2차원으로 추정하고, 동시에 최대온도와 발생 위치를 밀리초(millisecond) 단위로 분석하였다. 이를 통해 난류 유동장에서도 실시간 분석이 가능한 레이저분광 기반 2차원 온도 측정 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 1에서는 LAS 시스템을 구성하고 있는 계략도와 데이터 취득 시스템(data acquisition system) 실험 사진을 보여준다. LAS 시스템은 크게 가변 다이오드 레이저(DFB laser)와 시준기(collimator), 검출기(photodiode), 데이터 처리 시스템(data processing system), 모니터링 시스템(monitoring system)으로 구성될 수 있다. 가변 다이오드 레이저는 파장 가변이 가능한 다이오드 레이저로 특정 파장 범위에서 레이저를 조정하여 반응시킬 분자의 흡수선과 일치시켜 대상 분자에 반응하도록 한다. 시준기는 광원에서 나오는 광선을 평행한 빔으로 정렬시키는 광학 장치이다. 검출기는 광선이 흡수되는 양을 감지하는 광검출기로서, 조사된 빔이 반응 분자에 의해서 흡수되는 정도를 측정할 수 있도록 광신호를 전기신호로 변환시켜 준다. Fig. 1은 앞에서 설명된 흡수 광신호

가 데이터 취득 시스템에 의해 디지털 신호로 디스플레이된 실험 장면을 잘 보여주고 있다. 데이터 처리 시스템은 측정된 전기신호를 스펙트럼 데이터로 변환시켜 분석해주는 컴퓨터 시스템으로, 빔 분리기 (beam splitter)에 의해 분리된 다중 빔들의 신호를 CT 분석을 통해 샘플 내의 격자(grid)마다 온도 및 농도를 계산하고, 이를 이미지로 시각화한다. 모니터링 시스템은 시스템의 측정의 안정성과 정확성을 유지하기 위해 필요하며, 온도 상태를 모니터링하여 필요한 조치를 취할 수 있게 하는 시스템이다. 본 연구에서는 가스검출용 1388 nm 대역 레이저를 사용하였으며, 검출기에서 실험데이터를 취득하기 위해 500 kHz의 샘플링 속도로 흡수데이터를 취득하도록 하였다. 또한, 400개의 데이터를 사용하여 1주기 흡수스펙트럼으로 변환하여 CT 분석에 사용하였다.

3. CT 해석 및 분석 결과

식 (1)은 Beer-Lambert의 법칙으로 흡수 분광학의 원리를 설명하는 식이다. 빔의 입사광(I_0)과 투과광(I_t)의 비율을 통해 매질에서 흡수된 흡수량(A_λ)과 매질 내에서의 온도(T)와 농도(x) 관계를 추정할 수가 있다.

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-xL \sum_{\lambda_i} (S_{\lambda_i}(T)G_{vi})\right\} \quad (1)$$

여기서, I_t 와 I_0 의 비(ratio)는 A_λ 의 지수 함수의 관계식으로 구할 수가 있다. A_λ 는 반응 기체의 몰분율 (mole-fraction)인 x 와 흡수 투과 거리 L 에 비례한다. 또한, 파장 λ_i 에서 온도함수인 선 강도(line strength) $S_{\lambda_i}(T)$ 와 반응 기체의 선폭 확장(line broadening)함수인 G_{vi} 와의 곱을 흡수 반응에 관계한 파장의 시그마 합으로 표현된다. 시그마 합으로 표현하는 이유는 중심파장에서 흡수선 강도가 가장 크고 중심파장에서 멀어질수록 흡수선 강도가 줄어드는 가우스 분포를 따르는데, 가우스 분포 면적이 흡수량 A_λ 를 의미하기 때문이다. G_{vi} 는 선폭이 확장하는 정도를 결정하며 포크트 함수(Voigt profile)로 나타내어진다[9]. 온도 변화에 따라 선강도 $S_{\lambda_i}(T)$ 는 변하는데 다음의 식 (2)로부터 구할 수 있다.

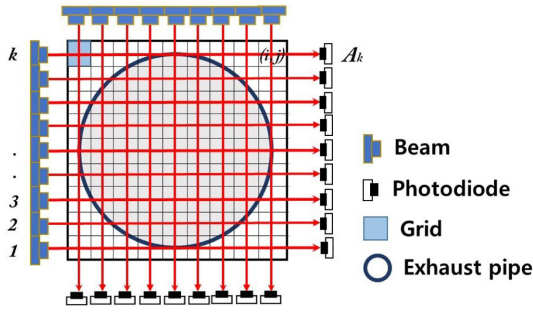


Fig. 2. Laser beam arrangement and grid configuration.

$$S_{\lambda,i}(T) \approx S_{\lambda,i}(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{T}{T_0} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_{0,i}}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_{0,i}}{kT}\right)\right]^{-1} \quad (2)$$

여기서, T 는 $S_{\lambda,i}$ 값을 구하기 위해 사용되는 기준 온도이며, T_0 는 표준 절대온도로 296 K, h [J·s]는 에너지와 시간의 관계를 설명하는 플랑크상수(Planck constant), k [J/K]는 온도와 열적 에너지의 관계를 설명하는 볼츠만 상수(Boltzmann constant), c [cm/s]는 진공에서의 광속인 빛의 속도, E'' (lower state energy)는 저준위 레벨의 상태 에너지, $v_{0,i}$ [cm^{-1}]는 파장의 역수로 나타내는 파수(wavenumber)를 의미한다. $Q(T)$ 는 온도 T 에서의 분배 함수(distribution function)이며, 주어진 온도에서 입자의 열적 상태를 나타내는 확률 분포로 일반적으로 고차다항식으로 나타낸다[10]. E'' 값은 HITRAN(High-resolution Transmission Molecular Absorption database)[11]에서 제공되는 값을 사용하였으며, 식 (2)부터 모든 온도 구간에서 $S_{\lambda,i}(T)$ 값을 구하여, CT 분석에서 온도를 추정하는 데이터로 활용하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 레이저 빔의 배치 상태와 격자 구성을 나타내는 개략도이다. 측정 범위 모든 영역에 레이저 빔이 지나갈 수 있도록 총 18 개의 빔이 배치되어 있으며, 빨간 화살표 실선은 레이저 빔이 직선으로 이동하는 가시선(line of sight)을 보여준다. k 는 레이저 빔의 번호이며, 정사각형 격자 하나의 길이는 4 mm이고, 격자 전체 영역은 45×45 mm이다.

식 (3)은 CT 분석에서 격자별 흡수량을 계산하는 관계식을 나타낸다.

$$A_k = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N L(x\alpha_n)_{(x,y,k)} \quad (3)$$

$$(\alpha_n = S_n(T)G_v)$$

여기서, 하첨자 k 는 격자로 조사되는 레이저 빔의 번호를 나타낸다. x , y 는 격자의 위치를 나타내기 위해 가로 x , 세로 y 의 좌표 번호를, n 은 흡수반응에 사용된 파장들의 개수를 의미한다. A_k 는 k 번째 빔이 측정 공간을 지날 때 흡수된 총 흡수량을 의미한다. 우변의 식은 k 번째 빔이 격자를 따라 지나가는 격자 좌표 (i, j) 에서의 흡수값들의 합을 나타내며, α_n 은 흡수계수(absorption coefficient)로 식(1)의 선강도 $S_n(T)$ 와 선평확장 G_v 의 곱으로 구한다. 따라서, CT 분석은 실험적으로 측정된 흡수량과 식(3)의 계산된 흡수량이 같아지도록 하여 온도 T 를 추정하는 원리이다. 본 연구에서 사용된 CT 재구성 알고리즘은 반복재건(iterative reconstruction)기법 중에서 많이 사용되는 MART(Multiplicative algebraic reconstruction technique)법[12]을 사용하였으며, 아래의 식 (4)로 표현된다.

$$\alpha_{n(x,y)}(N) = \alpha_{n(x,y)}(N-1) \times \left(\frac{A_{beam}}{\sum_{n=1}^N L\alpha_{n(x,y)}} \right)^{\beta L_{(x,y)}} \quad (4)$$

여기서, N 은 CT 재구성 계산 루프의 반복 횟수를 카운팅하는 값이며, β 는 이완매개변수(relaxation parameter)로 오차가 수렴하는 속도를 조절하는 기중치이다. 기중치는 일반적으로 0~1 사이의 값을 주며, 여기서는 0.05를 사용하여 계산의 속도보다 정확도를 높이도록 설정하였다. A_{beam} 은 실험흡수량이며, $\alpha_{n(x,y)}(N-1)$ 은 계산 초기의 흡수계수 값이고, $\alpha_{n(x,y)}(N)$ 은 반복 계산에 의해 갱신된 흡수계수 값이다. 초기의 흡수계수 값은 CMLOS(Corrective multiplication line-of-sight)법[13]을 사용하여 구하였다. CMLOS는 교차하는 가로와 세로 두 빔의 실험 흡수량을 곱한 후, 격자 전체 길이($L \times X$)로 나눠서 교차하는 격자에서의 초기 흡수계수 값으로 정하는 방법이다. 초기 흡수계수 값은 모든 격자마다 주어진 다. 초기 흡수계수 값으로부터 반복 계산을 수행하여

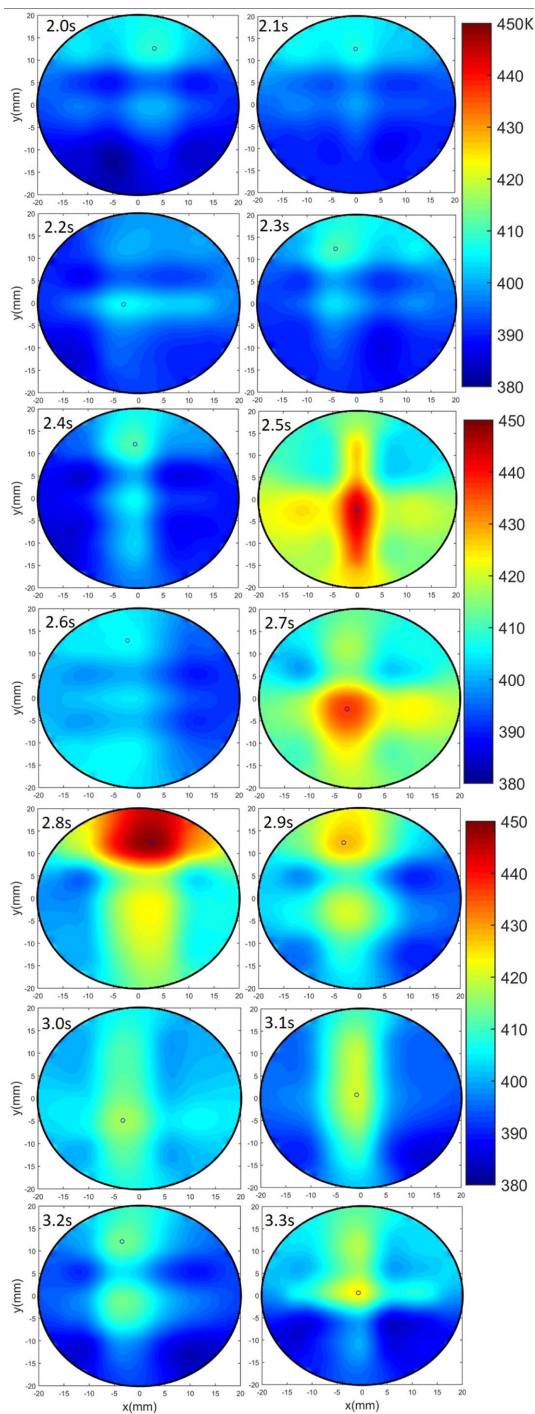


Fig. 3. Analysis Results of Time-Series CT Temperature distributions.

흡수계수 값이 새롭게 갱신되면 식(4)의 분수식에서 분모항은 A_{beam} 과 값이 점점 가까워진다. 즉, A_{beam}

에 계산된 흡수량을 나눠서 값이 1에 가까워지면 최소오차가 되는 것이다. 오차의 수렴 조건을 설정하여 무한루프를 방지하였는데, 오차가 10^{-5} 이하가 되면 반복계산이 종료되도록 하였다. 계산이 종료되면 그때 각 격자에서의 갱신된 흡수계수 값을 가져와서 식 (2)을 사용하여 격자마다 온도 T를 반환하여 2차원 온도를 추정하였다.

Fig. 3은 디젤 엔진을 공회전모드에서 작동하여 배출되는 배기가스를 대상으로 레이저빔 실험으로 측정된 흡수값으로부터 CT 분석으로 추정된 2차원 온도 이미지를 보여준다. CT 온도분포는 2.0초부터 3.3초까지 0.1초 간격으로 시계열로 분석되었으며, 온도 이미지의 해상도를 높이기 위해 큐빅 스플라인 보간(cubic spline interpolation)법이 적용되었다. 각 시간대별 온도 이미지를 보면 최대온도 값의 위치가 파란색 점으로 표시되어져 있으며, 분석 결과 최대 온도는 (0, 0)의 중심 좌표에서만 분포하는 것이 아니라, 그 위치가 지속적으로 변화하고 있음을 관찰할 수 있다. 온도장 형태는 가우스 분포를 따르고 있으며, 하나의 이미지에서 최대 4개의 가우스 분포 온도장도 있음을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구를 통해 레이저 빔을 이용한 2차원 온도 측정은 단일 지점 방식의 열전대로는 측정할 수 없는 난류 유동장의 온도 분포를 잘 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 측정 반응 속도도 수 초(second) 단위의 열전대보다도 빠른 밀리초 단위의 측정이 가능하였으며, 최대온도와 그 좌표를 실시간 추정하게 함으로써 난류 온도장 분석을 더욱 정밀하게 수행할 수 있었다.

Fig. 4는 CT 온도장과 열전대의 측정온도와 비교한 그래프이다. Fig. 4의 그래프 범례에서 Thermocouple은 중심 좌표에 설치된 열전대의 측정 온도이며, CT_Tmax는 해석된 CT 온도장에서 최대 온도 값이고, CT_Tcen은 CT 온도장에서 중심좌표 온도 값이다. Thermocouple의 온도범위는 401.0~423.2K, CT_Tmax은 402.0~449.2K, CT_Tcen은 395.3~447.1 K이었으며, 온도 변동폭은 각각 22.2 K, 47.2 K, 51.8 K으로 나타났다. 열전대 온도는 통상적으로 측정값의 평균온도로 주어지므로 온도 변동폭이 좁게 형성된 것을 알 수 있다. 이에 반해, CT 온도 측정은 밀리초 단위의 빠른 응답성으로 실시간 온도 변화를 잘 나타내고 있음을 볼 수 있다. CT_Tmax와

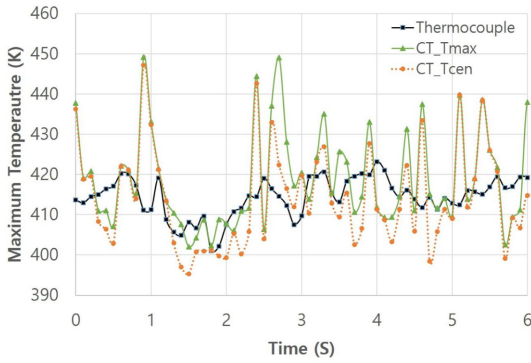


Fig. 4. Comparison of CT temperature distribution and thermocouple temperature measurement.

CT_Tcen이 일치하는 시간대는 중심부에서 최대온도를 가지며, 대부분의 시간대에서 CT_Tmax가 CT_Tcen보다 온도가 더 높은 것은 중심부가 최고온도가 아닌 것을 의미한다.

Fig. 5는 CT 온도장과 열전대 측정온도와의 오차를 6초 동안 시계열로 분석한 그래프이다. 오차 계산은 음수를 없애기 위해 두 참조값의 차에 절대값을 취하여 절대오차로 계산하였다. 실선 그래프는 중심좌표에서 측정된 열전대 측정온도와 CT_Tcen과의 시간대별 절대오차를 나타낸다. 일반적으로 엔진의 이상 유무 판별을 위해 단일지점 방식의 열전대를 이용한 온도 측정은 중심 위치가 최대온도라고 가정하고 측정한다. 본 연구에서는 열전대 온도와 CT_Tcen 온도와의 비교를 통해 중심 위치에서 최대온도가 아닐 경우, 지속적으로 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 점선 그래프는 CT_Tmax와 CT_Tcen과의 절대오차를 시계열로 나타내고 있다. CT 해석된 CT_Tmax와 CT_Tcen과의 오차를 분석하여 중심위치에서 최대 온도가 아닐 경우, CT 중심온도와의 오차를 분석한 것이다. 그래프에서 절대오차가 0인 시간대는 중심위치에서 최대온도가 발생했음을 의미한다. 2.8초에서는 절대오차가 26.7로 가장 크게 나타났으며, 그 이유는 Fig. 3의 온도장 이미지를 보면 확인할 수 있다. Fig. 3의 2.8초 온도장을 보면 최대 온도가 중심위치가 아닌 곳에서 가우스 분포 형태로 발생하고 있으며 이로 인해 CT_Tmax와 CT_Tcen과의 절대오차가 가장 크음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3의 2.2초, 3.1초, 3.3초

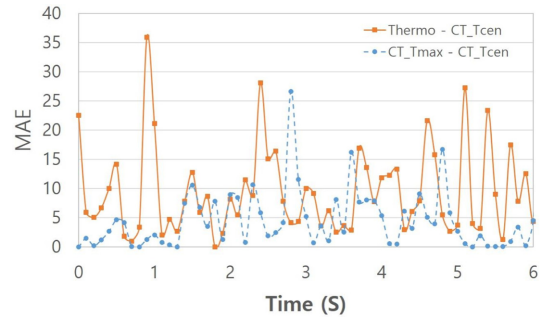


Fig. 5. Deviation between CT temperature distribution and thermocouple temperature.

온도장을 보면 중심부에서 최대온도를 보이고 있으며, 따라서 Fig. 5의 그래프에서 절대오차가 거의 0에 가까움을 확인할 수 있다. 이번에는 열전대 측정온도와 CT_Tcen과의 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)를 평가하기 위해 다음의 식 (5)로 계산하였다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |Thermo - CT_{Tcen}| \quad (5)$$

여기서, N은 데이터 총 개수로 61을 사용하였으며, 0~6초 동안의 61개 데이터를 의미한다. 평균절대오차는 9.28 K이었으며, 이는 단일 지점 측정방식의 열전대를 사용하여 측정 시에 얻어진 온도값을 최대온도로 판단하면 이와 같은 오차가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 난류 유동의 배기가스 온도를 측정하고자 한다면, 기존의 열전대를 이용한 측정 방식보다 레이저분광 기법을 이용한 방식 즉, 2차원 공간에서 최대 온도와 위치를 동시에 찾을 수 있는 측정 방식이 정확한 온도 판별 방식이라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LAS 기술을 활용하여 난류 유동장 내의 배기가스 온도를 실시간으로 측정 및 분석하는 방법을 제안하였다. 레이저 빔을 직사각 배열로 구성하여 격자 단위로 온도를 측정할 수 있게 하였고, 시계열 분석을 통해 0.1초 단위로 CT 온도장을 확인하였다. MART법과 CMLOS법을 사용한 CT 알고리즘을 이용하여 레이저의 흡수 신호 데이터를 분석하였고, 큐빅 스플라인 보간을 통해 온도장 이미지

의 해상도를 높일 수 있었다. 또한, 시계열별 최대 온도값과 최대온도 발생 위치를 동시에 추정하여 단일지점 측정방식의 열전대로는 분석할 수 없었던 2차원 온도분석을 수행하였다. 마지막으로 배기가스 중심부 위치에서 열전대로 측정한 온도와 LAS 방식으로 측정한 온도의 평균 절대 오차를 계산하여 LAS 측정의 정확도를 평가하였다. LAS를 이용한 온도 측정 방식은 난류 유동의 온도장 해석에 적용 가능하였으며, 앞으로 엔진의 이상 유무나 엔진 효율성 향상을 위한 연구에 신뢰성 있는 온도장 데이터 제공으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. K. Lee, S. Kim, K. Back, D. Rhee, Y. Kang, and S. Kho : *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, **25**(2) (2021) 88-97.
2. J. Liu, L. Zhu, Y. Ma, J. Liu, W. Zhou, and D. Yu : *Science China Technological Sciences*, **61** (2018) 567-586.
3. J. Liu, M. Bai, Z. Long, J. Liu, Y. Ma, and D. Yu : *Energies*, **13**(22) (2020) 5950.
4. H. M. Yan, X. J. Yi, H. N. Mu, Y. Q. Wen, H. Peng, and Y. Y. Yang : In 2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM) (2018) 1-6.
5. M. Prauzek, R. Hercik, J. Konecny, M. Mikolajek, M. Stankus, J. Koziorek, and R. Martinek : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **71** (2022) 1-11.
6. D. Yu, Y. Zhang, G. Liu, and K. Zhang : *The Journal of Engineering*, **23** (2019) 9123-9127.
7. C. Bong, J. Lee, H. Sun, J. Yoo, and M. S. Bak : *Measurement Science and Technology*, **32**(5) (2021) 055204.
8. D. W. Choi, D. H. Doh, and M. G. Jeon : *Journal of Mechanical Science and Technology*, **34** (2020) 2067-2074.
9. F. Stritzke, S. V. Kely, A. Feiling, A. Dreizler, and S. Wagner : *Applied Physics B*, **119** (2015) 143-152.
10. R. Gamache, S. Kennedy, R. Hawkins, and L. S. Rothman : *Journal of Molecular Structure* **517-518** (2000) 407-425.
11. L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, et al. : *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **130** (2013) 4-50.
12. D. W. Choi, M. G. Jeon, G. R. Cho, T. Kamimoto, Y. Deguchi, and D. H. Doh : *Journal of Thermal Science*, **25**(1) (2016) 84-89.
13. G. R. Cho and D. W. Choi : *Journal of Mechanical Science and Technology*, **35**(2) (2021) 525-534.