



Tomography 이용 가상값 및 회전값 적용 비정형 화염 내 OH 라디칼 농도 분포 재구성

김대해*

Tomographic Reconstruction of the Concentration Distribution of OH Radicals in an Irregularly Shaped Flame

Daehae Kim*

Received 18 September 2025 Revised 10 December 2025 Accepted 16 December 2025 Published online 23 December 2025

ABSTRACT The concentration distribution of OH radicals in flame is a crucial factor that affects its structure, efficiency, and characteristics. In this study, the concentration of OH radicals in a premixed methane-air flame was measured and reconstructed into a two-dimensional concentration distribution using several different computed tomography techniques. Several different metal fiber burners were used with both cylindrical and conical forms to produce an irregularly shaped flame. The heat load of the flame was 10,000 kcal/h with a lean fuel condition at an equivalence ratio of 0.9. Laser lines with wavelengths of 1.34 and 1.49 μm were crossed vertically in an 8 \times 8 scanning system at rotating angles of 0, 30, and 45 degrees relative to a reference direction and reconstructed via tomography at each angle to measure the concentration of OH radicals. The algebraic reconstruction technique (ART), multiplicative ART (MART), and simultaneous MART (SMART) algorithms were used to reconstruct the distribution of the concentration of OH radicals. We then compared the output of these methods with results obtained using an intensified charge-coupled device (ICCD) camera.

Key words OH radical(OH 라디칼), Tomography(단층촬영법), TDLAS(흡수분광법), Concentration(농도), Flame(화염)

Nomenclature

T_v : Fractional transmission, dimensionless
 K_v : Spectral absorption coefficient, cm^{-1}
 α_v : Spectral absorbance, dimensionless
S(T) : Linestrength, cm/mol
A : Absorption area,
 X_i : Concentration, ppm or %
L : Laser path length, m

Subscript

ART : algebraic reconstruction technique
MART : multiplicative art
SMART : simultaneous mart

1. 서론

화염 내 OH 라디칼은 모든 연료의 연소 반응에서 중요한 화학종으로 이 농도와 분포는 화염의 구조, 열부하, 당량비, 연소효율과 같은 연소 특성을 확인할 수 있는 요소이

Senior Researcher, Korea Institute of Industrial Technology

*Corresponding author: kimdh@kitech.re.kr

Tel: +82-41-589-8430

Fax: +82-41-589-8323

다. OH 라디칼은 연소 메커니즘에서 다양한 방식으로 생성되며, 연소 내부에서만 생성되는 특징을 갖고 정상상태의 화염에서는 농도가 유지된다. 또한 OH 라디칼의 농도를 측정하는 것으로 연소의 특성을 확인하고 연소 조건의 제어를 통해 효율을 증대할 수 있다.^[1~3] OH 라디칼은 화염 내부에서의 농도는 유지되지만 생성과 소멸 속도가 매우 빠르게 일어나고 반응이 강하기 때문에 샘플링 방식의 측정 방법으로는 정량적인 측정이 불가능하다. 파장가변형 레이저 흡수분광법 TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 측정법은 높은 정밀도와 신뢰도로 측정하고자 하는 대상의 정량적인 농도 및 온도 측정이 가능하며, *In-situ* 측정 방법으로 연소 환경을 정밀 측정하기 용이하다.^[4,5] 따라서 TDLAS 측정법을 통해 연소 환경의 OH 라디칼의 농도장을 측정하고 토모그래피 기법을 적용하여 재구성하고자 하였다. 기존 연구에서 So *et al.*^[5]은 근적외선 레이저를 이용하여 OH 라디칼의 정량적 농도를 측정하였으며, 선형적 평균값을 제시하였다. 또한 Bao *et al.*^[6] 및 Liu *et al.*^[7] 등은 TDLAS 기반 토모그래피를 통하여 연소 환경에서의 온도장 및 질소산화물의 농도장 재구성하고 수치의 정확도를 판단하였다. 하지만 대부분 사각형, 또는 원형의 test bath를 대상으로 측정 및 재구성이 이루어졌으며, 산업 현장에서 사용되는 연소기를 통해 형성되는 화염 역시 사각, 원형으로 구성되어 있다. 토모그래피 기법을 이용한 재구성 과정은 x, y축 기준으로 레이저를 투과시켜 측정 대상의 정보를 균일하게 얻을 수 있도록 구성한다. 습득 정보의 비균일 상태 즉 비정형 형상에 따른 재구성의 정확도를 판단하지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 비정형 형상의 Metal fiber 버너에서 발생하는 OH 농도 값을 측정하였고 가시적 정확성을 파악하고자 하였다. 이는 향후 화염 형상 다변성을 가지는 난류 화염장에서의 측정 가능성 여부 확인이 가능하며 고속 유동, 대형 유동 면적 조건에서 적용이 용이할 것으로 판단된다. 실제 측정값에 근거한 가상 값 적용을 통해 농도 분포를 비교 분석하였다. 또한 레이저 투과 각도에 따라 OH 농도를 측정하였으며, 토모그래피 기법 내 반복 계산법에 따른 재구성 값을 분석하였다. 반복 계산법 기준 각도별 농도 값 통합 시 농도 분포 재구성에 미치는 영향을 파악하였다. 단 OH 라디칼 측정 정확도를 레이저 측정 방법 외 다른 분석기를 활용하여 비교 분석하기 어려

운 상황으로 ICCD 카메라를 이용, 정규화된 OH 라디칼 강도 값과 비교하는 연구를 수행하였다.

2. TDLAS 및 토모그래피 이론

2.1 TDLAS 이론

TDLAS는 Fig. 1과 같이 가스상 물질이 특정 파장의 에너지를 흡수하는 원리에서 응용이 된 측정 방식으로, Beer-Lambert 법칙에 기반한다.^[8~10]

레이저 광이 측정하고자 하는 가스를 투과하여 가스종의 흡수 전이와 공명하게 되면, 레이저 광 파장의 일부분에 흡수가 일어나고, 이를 수치적으로 적분하여 가스의 농도 혹은 온도를 계산할 수 있다. 파장 가변된 광이 측정하고자 하는 가스를 투과한 후의 빛의 강도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_v \equiv \left(\frac{I_t}{I_0} \right) = \exp(-k_v \cdot L) \quad (1)$$

$$k_v = PX_i S_{i,j}(T) \phi(v - v_0) \quad (2)$$

이때 τ_v 는 레이저 투과율을, I_0 와 I_t 는 각각 초기 레이저 강도와 투과 강도를 의미하며, k_v 는 흡수 계수(Spectral absorption coefficient)를, L 은 레이저의 길이를 나타낸다. 식 (2)에서의 선형 함수인 $\phi(v - v_0)$ 는 $\int \phi(v - v_0) dv = 1$ 로 정량화 할 수 있기 때문에 흡수 면적 A 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$A = \int \alpha_v dv = PX_i S_{i,j}(T) \quad (3)$$

$$X_i = \frac{A}{PS_{i,j}(T)L} \quad (4)$$

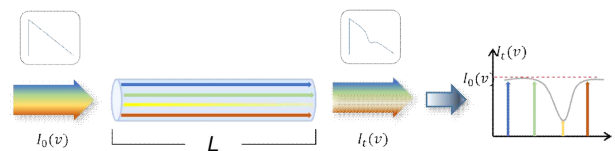


Fig. 1. Simple concept draw about TDLAS

여기서 P 는 전체 압력, x_i 는 대상 가스의 몰분율을 뜻하며 흡수 선강도 $S_{i,j}(T)$ 는 온도에 의존하는 함수로서 HITRAN, HITEMP 등의 데이터 베이스를 통해 다양한 가스 종의 데이터를 얻을 수 있다. 흡수 선강도는 다음의 식과 같이 정리할 수 있다.^[11] TDLAS 흡수분광법을 이용한 연소장 내에 발생하는 가스의 농도 및 온도를 측정하는 과정에서 압력과 온도에 영향을 받을 수 있다. 이는 압력 확장, 도플러 확장 등에 의해 흡수 신호 변형이 일어난다. 또한 연소장에서 발생하는 OH 농도의 경우 농도가 매우 낮아 흡수 신호 크기가 작고 노이즈 간섭이 용이한 측정 대상이다. 본 연구에서 OH 농도 측정을 위해 압력, 온도, 낮은 신호 등을 반드시 고려가 필요하며 이를 해결하고자 OH 라디칼 흡수 면적 도출을 위한 Voigt profile을 사용하였다.

2.2 토모그래피 이론

토모그래피는 파원으로부터 발생하는 전자기파가 매질을 투과하여 수신되는 신호를 이용 대상의 내부를 재구성하는 방법이다. 본 연구에서는 컴퓨터 단층 촬영 기술로 불리는 토모그래피 기법과 TDLAS 측정법의 결합을 통해 2차원 농도장의 재구성 해석을 진행하였다. 다양한 토모그래피 기법 중 ART, MART, SMART 반복 계산법을 이용하여 OH 라디칼의 농도장을 재구성하였다.

2.2.1 ART(Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘

ART 알고리즘은 토모그래피 기법 중 고전적으로 가장 많이 사용되는 기법이며, 초깃값과 참조 값의 교차하는 단면에서 배열 간 조합을 연립방정식의 형태로 풀어나가는 방법으로, 다음과 같은 식을 가진다.

$$\overline{\Phi}_i = \sum_{j=1}^N w_{i,j} f_j \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\overline{\Phi}_i$ 는 흡광도, w 는 흡수 구간에서의 레이저 길이(path length), f 는 흡수 계수를 의미하며, i 는 레이저의 path, j 는 임의의 격자를 설정한 cell을 의미한다. N 과 M 은 각각 격자 내부에서 한 path의 cell의 개수, 그리고 레

이저의 총 개수를 의미한다. ART 알고리즘은 식 (5)를 기준으로 다음과 같은 단계를 거치며 반복 계산을 수행한다.

$$\Delta \Phi_i = \Phi_i - \overline{\Phi}_i \quad (6)$$

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^N w_{i,j}^2 \quad (7)$$

$$\widetilde{f}_j^{new} = \widetilde{f}_j^{old} + \lambda \frac{w_{i,j} \Delta \Phi_i}{\alpha_i} \quad (8)$$

위 식에서 $\Delta \Phi_i$ 는 실험을 통해 얻을 수 있는 레이저 흡광도 값(Φ_i)과 초깃값부터 반복 계산을 통해 얻어지는 흡광도 값($\overline{\Phi}_i$)의 차를 의미한다. 또한 λ 는 Relaxation parameter로 반복 계산을 수행하는 과정에서 정확도와 수렴률을 결정하는 인자이다.^[12]

2.2.2 MART(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘

MART 알고리즘 역시 ART 알고리즘과 마찬가지로 반복 재구성 방법 중 하나로, ART 기법은 수렴 과정에서 덧셈을 중심으로 구성되지만, MART 기법은 곱셈을 중심으로 계산을 수행하는 재구성 방법이다. 목표값과 계산된 값의 비를 이용한 배수적 계산으로, ART 기법보다 빠른 수렴 계산 결과를 도출할 수 있다. MART 기법은 다음과 같은 식으로 구성되어 계산을 수행한다.^[13,14]

$$\overline{f}_j^{new} = \overline{f}_j^{old} \times \left(\frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^N \overline{\Phi}_i} \right)^{(\lambda w_{i,j})} \quad (9)$$

2.2.3 SMART(Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 알고리즘

SMART 알고리즘은 동시 반복 재구성 방법으로 MART 기법과 같이 곱셈을 기반으로 계산을 수행하지만, 가로 축과 세로 축을 동시에 계산하는 식으로, 많은 양의 데이터를 처리할 때 유리하다는 장점이 있다.^[15]

$$\overline{x}_j^{new} = \overline{x}_j^{old} \times \exp \left(S_j^{-1} \sum_{i=1}^I P_{i,j} \log \frac{y_j}{(P x^k)_i} \right) \quad (10)$$

위의 식에서 x_i 는 흡수 계수를 의미하며, S_j 는 레이저 path 내부 각 cell(j)의 레이저 길이의 합 $\sum_{i=1}^I P_{i,j}$ 을 뜻한다. $P_{i,j}$ 는 레이저 길이를 의미하며 y_i 는 실험을 통해 얻은 흡광도, 그리고 $(P_{i,j})_i$ 는 반복 계산을 통해 얻어지는 흡광도를 의미한다.

3. 실험 방법

3.1 파장 선정

HITRAN 데이터베이스를 기반으로 파장 선정을 진행하였으며 온도의 경우 연소장에서 발생하는 배기가스 내 H₂O 및 OH 라디칼을 측정해야 됨으로 온도에 따른 선강도와 파장을 선택하지 않고 배기가스 온도와 유사한 온도 조건 입력 후 파장 선정을 진행하였다. 즉 고온 연소장에서 H₂O 흡수선의 온도 의존성은 선강도 변화에 직접적 영향을 미침으로 HITRAN 기반 temperature dependence 보정을 1,473K 조건에 맞추어 적용하였고 온도 변화로 인한 오차를 최소화하였다. 예상 환경 조건인 1,473K, 상압 환경에서 측정에 적합한 파장을 선정하였으며 Fig. 2는 온도 1,473K 조건에서 H₂O 및 OH 라디칼 파장에 따른 선강도를 보여준다.

단일 가스 종의 측정을 위해서는 기본적으로 다른 가스 종의 간섭이 존재하는 파장을 제외하고 선정해야 하지만 대부분의 OH 라디칼 파장 영역에는 H₂O의 간섭이 존재한다. 이를 위해 H₂O의 흡수 면적을 다른 파장의 레이저를 이용하여 단독적으로 측정하고, OH 라디칼 측정 파장에서 그에 맞는 면적 값을 제거하여 OH 라디칼의 농도를 도출하

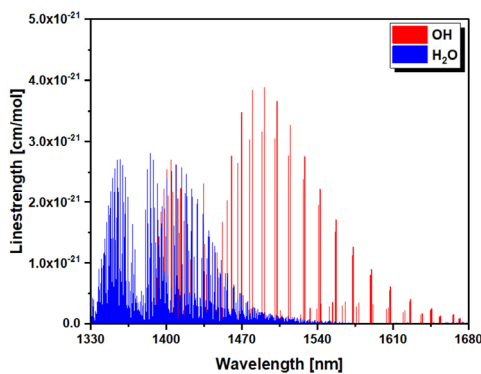


Fig. 2. Linestrength of H₂O and OH radical at IR wavelength in 1,473K, 1atm

는 방법을 사용하였다.^[1] 이 때 H₂O 측정 파장은 약 1.3 μm , OH 라디칼 측정 파장은 약 1.5 μm 로 선정하였다.^[5]

3.2 H₂O 파장 선정

Figure 3은 H₂O 파장 선정 과정을 보여준다.

타 가스 종과의 간섭은 주변 환경의 온도, 압력, 농도 등에 따라 상이하게 적용되며 측정 파장도 고려하여야 한다. 예를 들어 측정 환경의 온도나 압력이 높다면 흡수 선폭이 증가하여 타 가스 종의 흡수 영역 중첩에 의해 영향을 받을 수 있다. 또한 측정 가스 종의 농도에 비해 주변 환경에 존재하는 가스들의 농도가 높다면 흡수 선강도 값이 높더라도 간섭이 존재할 수 있어 측정 환경 고려가 필수적이다. 이외에도 레이저의 파장이 증가함에 따라 스캔 범위가 증가하게 되는데 본 연구에서 사용된 레이저의 경우 한 램프당 1 nm 이하 정밀 측정이 가능하여 타 가스 종 선강도 값의 간섭 영향이 적은 특성을 가진다. 따라서 H₂O 파장은 약 1.3 μm 파장을 선정하였으며, 이때의 선강도 값은 약 2.5×10^{-22} (cm/mol)의 광 흡수 선강도 값을 가진다. 연소 영역에서의 온도 및 농도를 측정하기에 path length 1 m 기준, 적합한 선강도 값을 갖는 파장으로 선정하였다.

3.3 OH 파장 선정

Figure 4는 OH 라디칼 파장 선정 과정을 보여준다.

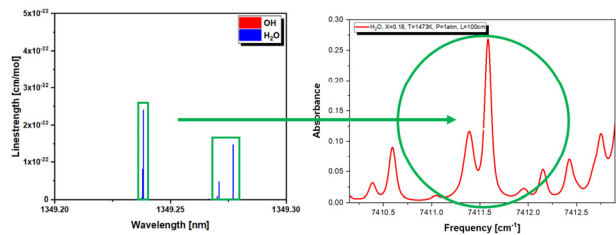


Fig. 3. Linestrength of H₂O in 1,473K, 1atm, path length 1 m

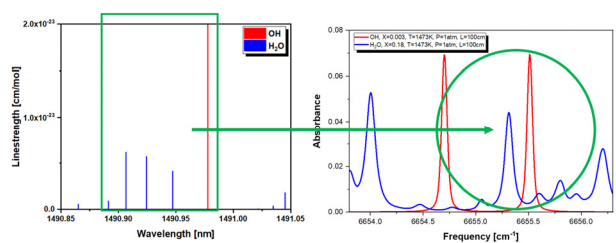


Fig. 4. Linestrength of OH in 1,473K, 1atm, path length 1 m

OH 라디칼 농도를 측정하기 위한 파장은 약 1.5 μm 의 파장을 선정하였으며, 이때의 선강도 값은 약 2.0×10^{-23} (cm/mol)의 광 흡수 선강도를 가진다. 대부분의 가스 계측을 위해서는 다른 가스종의 간섭이 존재하는 파장을 선호하지 않지만, OH 라디칼의 선강도가 비교적 낮은 것을 고려하였을 때, H₂O의 간섭을 계산된 값을 통해 제거하는 것이 OH 라디칼 농도 분석에 더 용이하므로, H₂O의 간섭이 존재하지만 OH 라디칼의 선강도가 강한 영역으로 선정하였다. 각 레이저들은 자유스펙트럼 범위(Free Spectral Range, FSR, 2 cm^{-1})를 갖는 에탈론(Etalon)을 이용하여 레이저 광을 검출함으로써 광흡수 신호의 시간영역을 파장영역으로 변환한다.

3.4 Metal fiber 버너

메탈 파이버 버너는 Fig. 5의 화염 형상과 같은 모양으로 제작되었다. 메탈 파이버 버너는 연료와 산화제가 연소 반응이 일어나기 전 미리 혼합되어 화염을 형성하는 예혼합 및 층류화염의 대표적 버너로 화염 온도, 연소 속도, 길이, 배출가스 등이 균일한 특성을 가진다. 메탈 파이버 특성을 규명하는 여러 연구들이 진행되었으며,^[16] 토모그래피 기법을 적용하여 정형, 비정형 상태에서 발생하는 화염 특성을 파악하고 재구성하는데 적합하다고 판단하였다.

상단부(D)에서는 원형, 하단부의 다각형(A~C)형상을 갖도록 설계하였으며, 회전각별 측정 후 재구성 결과를 비교 분석하였다.

A, C 구간은 각도 40°, 각 길이 65 mm, 55 mm 이며 B 구간 각도 67° 기준 길이 60 mm, D 구간 변을 중심으로 양쪽 길이는 80 mm 로 설계 및 제작하였다. 버너 열량은 약 10,000 kcal/hr이며 적용 연료는 LNG를 사용하여 실험하였다.

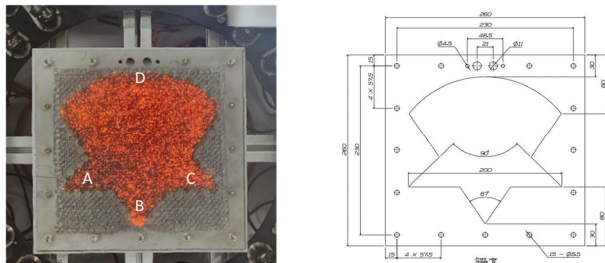


Fig. 5. Flame picture at metal fiber burner

3.5 광학계 실험장치

광학계의 구성은 Fig. 6과 같이 설치하였다. H₂O의 흡수 면적을 제거하면서, OH 라디칼 측정을 위한 두 종류의 레이저를 같은 경로에 투과하는 MUX(Multiplexer), De-MUX (Demultiplexer) 포함 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 시스템을 이용하였다. MUX는 다수 레이저 사용시 선택한 단일 레이저 신호만 출력할 수 있는 장치이며, De-MUX는 MUX 장치와 반대로 레이저 두 대의 신호를 나누어 각 detector로 출력 가능한 장치이다. MUX 시스템을 통하여 경로가 일치된 두 개 파장의 레이저는 빔 스플리터를 통해 총 16개의 레이저로 분기되고, 화염을 투과한 후 다시 De-MUX를 통해 두 개 파장의 레이저를 분리 후 photo detector로 수신되어 분석을 진행하였다. 즉 발신부 총 16개의 레이저가 x축, y축 기준 8 by 8 형태로 투과되며, 수신부 역시 동일하게 설정하였다.

또한 발신부와 수신부가 Fig. 6과 같이 회전 가능하도록 설계 반영하였으며 각도 변화에 따라 OH 농도 값을 측정하였다. 회전 각도는 0°, 30°, 45° 회전 가능하며, 1.5 μm 파장 레이저의 파워 한계로 인해 x축 기준 8 path, y축 기준 8 path 총 16개의 path 및 64개의 cell을 형성하도록 하였다. 레이저 특성상 발신부 파워 저감에 따라 왜곡 및 noise에 취약해지며 특히 토모그래피 기법과 같이 최소한의 레이저를 이용하여 격자화하고 최대의 정보 습득을 위한 발신 파워 한계가 존재한다. 회전각 선정에 있어 90° 이상 180°, 270° 등 측정 시 대칭을 이뤄 측정 방향이 중첩되는 것으로 판단 90°이내 0°, 30°, 45° 각도를 선정하였다. Figure 7에서 보여지는 숫자는 path를 나타낸다. 8 by 8 기준 각도별 OH 농도 분포를 재구성하였고 또한 실제 측정값을 바탕으로 가상 값을 형성. 이를 포함하여 반복 계산을 통해 15 by 15 기준으로 재구성하였다. 가상 값의 경우 Fig. 4와 같이

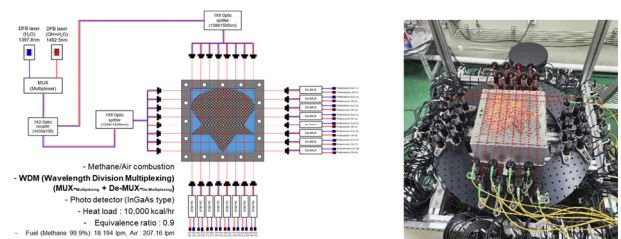


Fig. 6. Schematic diagram and of optical setting

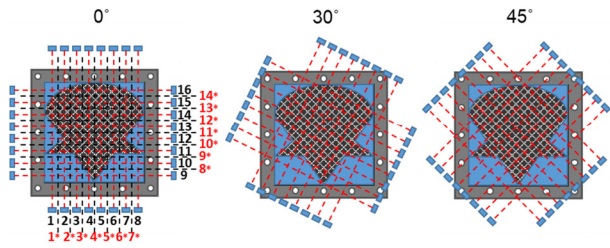


Fig. 7. Path, Cell, Rotation angles of each laser setting

1 path와 2 path의 각 cell별 흡수 계수를 평균화하여 가상 1* path를 설정하였다. 반복적으로 2* path부터 14* path까지 설정하여 기존 8 by 8 형태의 실제 측정값과 가상 값 추가를 통해 15 by 15를 형성하여 OH 농도 분포를 재구성 하였다. 이는 추가 레이저 및 광학계를 설치하지 않고 실제 측정값에 근거하여 보다 많은 정보를 재구성 과정에 적용 할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

4.1 OH 농도 측정 결과

OH 라디칼 흡수 계수를 도출하는 과정은 각 신호별 흡수 데이터를 multi Voigt fitting을 진행하고, H₂O의 흡수 면적 값을 제거함으로써 OH 라디칼의 흡수 면적 및 계수를 도출하였다. H₂O 흡수 제거 과정은 동일 optical path 내에서 H₂O 농도가 예혼합화염 조건에서 상대적으로 균일하게 분포한다는 점에 기반하여 제거 또는 필터링을 수행하였다. 이는 HITRAN 데이터에서 제시되는 선강도 비교 결과, 본 실험 조건에서 path-wise 변동이 미미함을 확인한 데 따른 것이다. 각 H₂O 및 OH 라디칼 흡수 면적 분석은 H₂O의 경우 신호의 한 램프 파당 주기를 1 kHz으로 설정하여 레이저를 투과하였으며, DAQ 시스템으로 받는 데이터는 10 ms/s이다. 이에 따라 1초에 약 1,000개의 램프파 데이터를 수집하고 이를 평균 낸 데이터값이다. 기존 흡수 신호가 없는 램프파와 동일하도록 baseline을 설정하고, baseline과 흡수 신호의 차이를 Voigt function을 이용하여 fitting을 진행한 후 계산을 진행하였다.

OH 라디칼의 농도 값은 매우 낮기 때문에 신호의 크기가 작고 노이즈의 간섭이 발생한다. 노이즈 처리는 각 램프

Table 1. Average path concentration and absorbance area of OH radical

Angle	No	OH concentration [%]			H ₂ O absorbance area [cm ⁻¹]		
		0°	30°	45°	0°	30°	45°
Path	1	0.162909	0.270888	0.296836	1.158689	3.709399	3.947141
	2	0.339055	0.353879	0.351514	3.551147	4.184697	4.782143
	3	0.455184	0.414274	0.430602	5.424094	6.762276	6.755967
	4	0.532398	0.454414	0.476547	4.884239	5.543088	7.552896
	5	0.514937	0.469512	0.519250	5.357025	5.551821	7.125980
	6	0.464514	0.454898	0.426866	5.447183	7.630204	5.251801
	7	0.356764	0.168570	0.295367	4.307748	2.473799	2.924348
	8	0.161078	0.000001	0.160561	2.132032	5.283781	2.247458
	9	0.136888	0.000001	0.000001	0.631944	0.631943	2.142446
	10	0.859994	0.255068	0.377307	3.352446	3.896197	3.104127
	11	0.447764	0.339359	0.456283	6.317214	4.806047	5.100137
	12	0.436416	0.457622	0.448919	4.895995	5.994955	7.709265
	13	0.422381	0.446951	0.475884	4.897837	7.191535	8.308756
	14	0.487714	0.429206	0.421699	6.182458	6.505041	5.292561
	15	0.388571	0.364849	0.373415	5.385884	6.194194	5.796501
	16	0.201477	0.244977	0.314244	2.825756	4.715978	4.584617

파형을 진폭 기준으로 리스케일(정규화)하여 동일 기준으로 보정한 후 평균화를 통해 분석에 사용하였다. 평균화를 통해 랜덤 노이즈가 억제되어 신호대잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 효과적으로 향상된다. 1차 평균화로 제거되지 않은 잔류 노이즈는 MATLAB의 moving-filter 기반 smooth 함수를 적용하여 추가 제거를 진행하였다. 노이즈 제거 작업 이후 피팅 진행 시 Lorentzian fitting 값과 Gaussian fitting 계수를 조절함으로써 신호의 형태와 일치하는 Voigt fitting으로 흡수 신호를 분석하였다. Table 1은 위 과정을 거쳐 도출된 각 path 별 cell에서 계산된 OH 농도들의 평균값을 나타낸다. 이는 ART 반복 계산법을 통해 재구성된 cell 내 OH 농도 값들의 평균값이며 대표적으로 정리하여 나타낸다.

4.2 실제 측정값 및 가상 값 분석 결과

각도에 따라 측정된 OH 라디칼 농도를 실제 측정값 8 by 8 기준 농도 분포를 2D mapping 하였으며, 실제 측정값과 가상 값을 추가하여 15 by 15 기준 분포도와 비교 분석 하였다. 또한 토모그래피 기법 ART, MART, SMART 반복 계산법에 따라 mapping을 진행하였다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각각 0°, 30°, 45°에서 반복 계산법에 따른 8

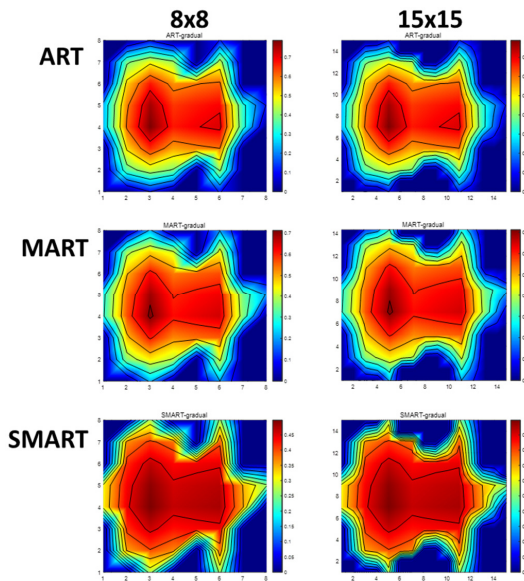


Fig. 8. Reconstruction results at 0°

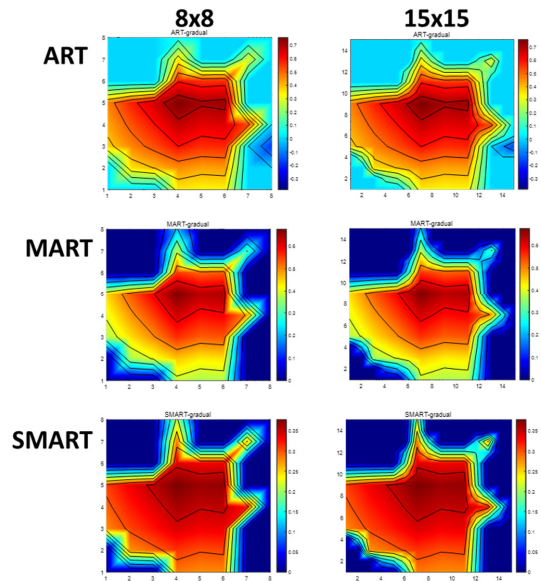


Fig. 10. Reconstruction results at 45°

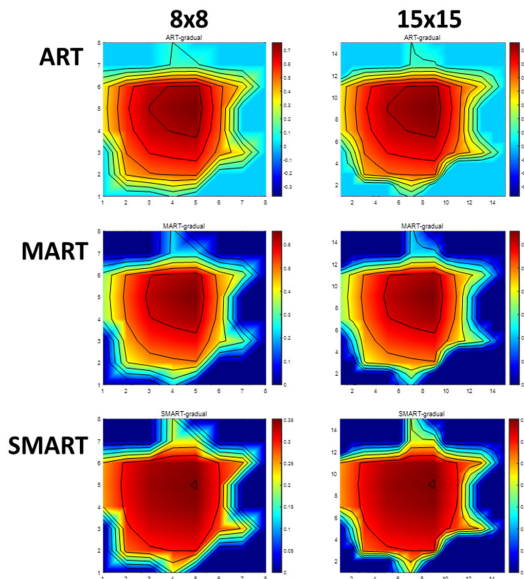


Fig. 9. Reconstruction results at 30°

by 8, 15 by 15 OH 농도 분포를 나타낸다.

분석 결과 8 by 8 결과보다 15 by 15 농도 값들의 분포 결과가 화염 유무를 명확히 mapping 가능한 것을 확인할 수 있다. 이는 재구성 시 증가된 레이저 정보와 전체 격자 내 cell 및 path 증가에 따라 분해능이 증가하는 결과이다. 또한 각 반복 계산법에 따른 차이를 살펴보면, 가시적 버너 외부 형상에 대한 재구성 비교는 어려울 것으로 판단된다. 하지만 화염 내 OH 라디칼 농도 값을 살펴보면, ART,

MART, SMART 순서로 농도 값이 균일해지는 것을 확인할 수 있다.

Metal fiber 버너는 특성상 균일 화염을 형성하는 버너로 OH 라디칼 역시 연소 시 균일하게 발생하는 화염 구조이다. 따라서 SMART 반복 계산법이 보다 정확도가 높은 것으로 사료된다. 또한 회전각 0°를 제외하고 버너 A, B, C 구간들이 명확히 구성되지 않는 현상들이 발생되며, 특히 D 구간의 경우 회전각이 증가하고 레이저 개수가 감소할수록 분해능이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 비정형 형상의 변과 레이저의 경로가 일부 평행한 경우 재구성이 원활하게 이루어지나, 급격한 각도 변형 및 곡선 형태를 재구성하기 위해서는 레이저를 추가하여 path 및 cell 증가, 분해능 증가 후 재구성 과정이 필요할 것으로 판단된다. 추가적으로 ART, MART, SMART 반복 계산법 내에는 Relaxation parameter(λ)가 존재하며, 이는 수렴 속도에 영향을 주는 가중치 역할을 가지고 있다. 레이저 path 개수, 계산량에 따라 영향을 미치며 적합한 설정을 통해 반복 계산 속도를 감소할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 0.1부터 1.0 사이 각 0.001 간격으로 Relaxation parameter을 검토하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같이 도출하였다.

ART, MART 반복 계산법에서는 λ 값이 낮을 경우 대폭 계산량이 많아지는 것을 확인하였으며, λ 값이 증가할수록 계산량이 감소하지만 $\lambda = 1$ 이상부터는 대부분 발산이 일

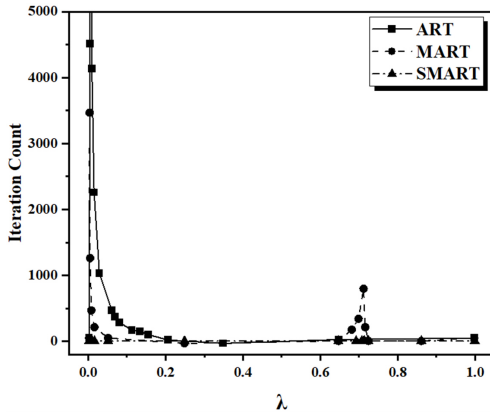


Fig. 11. Iteration count according to relaxation parameter

어나는 것을 확인하였다. ART 계산법은 $\lambda = 0.794$, MART 계산법은 $\lambda = 0.361$ 에서 가장 낮은 계산량 즉 가장 빠른 수렴 속도를 보였으며 SMART 계산법의 경우 대부분 동일한 속도로 계산되었다.

4.3 회전 값 통합 재구성 결과

Fig. 12는 Fig. 8 부터 Fig. 10의 각도에 따라 측정된 OH 라디칼 농도 분포 재구성 결과값을 통합하여 반복 계산법 따라 비교 분석하였다. 즉 ART, MART, SMART를 적용하여 재구성된 0° , 30° , 45° 3가지 OH 농도 값들을 통합하여 재구성 및 mapping을 진행한 결과이며, 8 by 8, 15

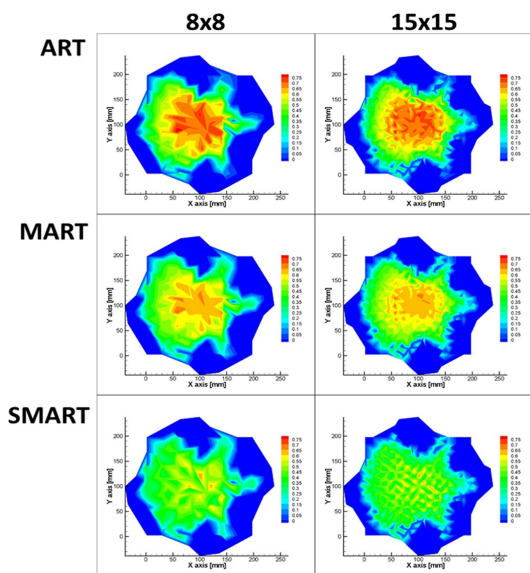


Fig. 12. Reconstruction at total angle

by 15로 정리하였다. 각도별 합산 및 평균 결과, OH 라디칼의 재구성 분포도가 가시적으로 버너의 비정형 형상과 매우 유사한 결과를 확인하였다. 이는 30° , 45° 결과에서 분해능 감소에 따라 재구성되지 않았던 각도(A, B, C) 및 곡면(D) 구간이 0° 결과와 통합되면서 다수의 OH 라디칼 농도 값들이 확보된 것으로 판단된다. 또한 재구성 통합 결과 중 SMART 반복 계산법이 가장 내부 농도가 균일하게 재구성되었으며, 이는 15 by 15 분포 결과에서 확인 가능하다. 통합 재구성 결과 분석을 통해 토모그래피 재구성 과정에서는 측정 대상 기준 path 및 cell 증대를 통한 분해능 확보, 다양한 각도에서의 정도 습득이 매우 중요한 분석 인자로 판단된다.

4.4 재구성 결과 및 ICCD 결과 비교

본 연구를 통해 측정된 OH 라디칼 농도 측정 방식 외 정량적 측정 방법 부재로 정확도를 수치적으로 판단하기 어려운 상황이다. 또한 ICCD 기반 OH 라디칼은 화학적·광학적 여기로 생성된 전자적 여기 상태(excited state)로 라디칼 방출을 이미징하여 반응 영역의 공간 분포를 정성적으로 보여준다. 반면 TDLAS는 기저 상태(ground state)의 OH 분자에 의한 흡수를 직접 측정하여 온도 및 광경로 길이 정보를 적용하면 정량적 농도를 제공한다. 두 기법은 서로 다른 분자 상태와 신호 메커니즘을 다루기 때문에 측정 결과를 동일 기준으로 직접 비교하는 것은 본질적으로 어렵다.

따라서 토모그래피 기법 적용 OH 농도 값과 ICCD의 정성적 강도 값을 수치화하여 비교 분석을 진행하였다. ICCD의 intensity 값을 토모그래피 농도 재구성 분포와 동일하게 격자화 하였으며, 정규화를 통한 비교를 위하여 격자 내 cell 결과값을 cell 최솟값으로 나누어 1 이하의 값이 나오도록 설정하였다. 동일 cell 위치에서의 ICCD 강도 값을 x , 토모그래피 농도 값을 y 로 설정하여 Root mean square 값을 식 (11)을 통하여 Table 2와 같이 도출하였다. 각 반복 계산법에 따른 정확도를 정리하였으며, Fig. 13 역시 재구성 결과값을 비교한 그래프이다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (11)$$

Table 2. Root mean square of ICCD and tomography method

Method	path	R ²
ART	8 by 8	0.47407
	15 by 15	0.54806
MART	8 by 8	0.55734
	15 by 15	0.73416
SMART	8 by 8	0.59487
	15 by 15	0.79458

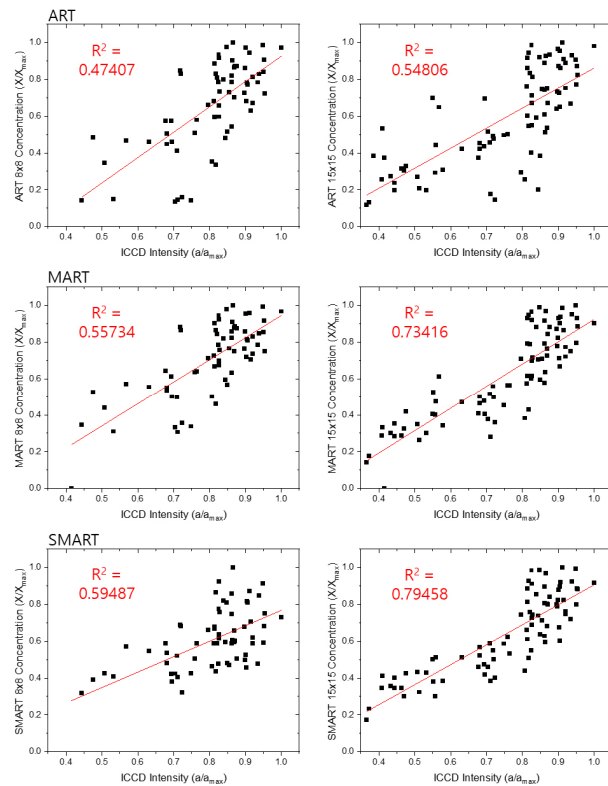


Fig. 13. Root mean square of ICCD and ART, MART, SMART

SMART 반복 계산법이 비교적 ICCD 강도 값과 유사한 가장 높은 R² 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 균일 화염 내 OH 라디칼 농도는 균일할 것으로 판단되며, 전체적인 실험 결과값 중 ART, MART, SMART 순으로 비정형 내 재구성 농도 값이 균일해지는 변화에 따른 결과로 확인된다.

8 by 8 대비 가상 값 적용을 통해 15 by 15 결과 값 역시 R² 값이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 정성적 값과 정량적 값 비교에 있어 차이가 감소하는 실험적 결과를 확인할 수 있으며 sensitivity 증가에 의한 것으로 대신 판단할 수 있다.

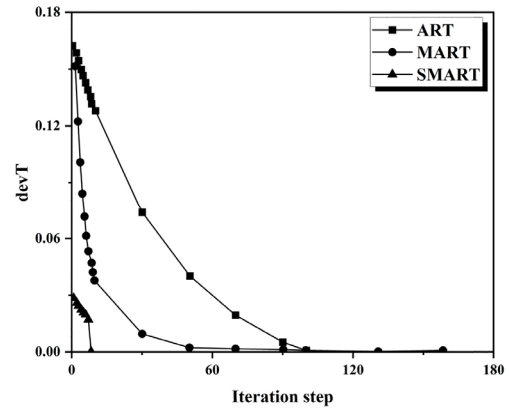


Fig. 14. Relative mean square error of ICCD and ART, MART, SMART

또한 식 (12)를 이용하여 각각의 반복 계산법들의 정확도 및 속도를 계산하였으며 결과값을 Fig. 14와 같이 그래프로 나타내었다. 식 (12)는 상대평균제곱오차(Relative mean square error) 계산 방식으로 결과 및 초깃값을 활용하여 반복 계산에 대한 정확도 및 속도를 확인할 수 있다.

$$DevT = \sqrt{\frac{1}{I \times J} \sum_{i,j=1}^{i,j} \left(\frac{T_{i,j}^{cal} - T_{i,j}^{orig}}{\max(T^{orig}) - \min(T^{orig})} \right)^2} \quad (12)$$

x축 Iteration step은 ART, MART, SMART 각 반복 계산법들이 수렴하는 동안 계산된 횟수를 나타냄으로써 계산 속도를 확인할 수 있으며, y축 DevT 기준 0으로 갈수록 정확한 수렴 값을 나타내며 초기 반복 계산 시작 포인트와 0 값의 간격은 정확도의 차이를 나타낸다. 계산 시작 포인트가 0에 가까울수록 보다 수렴된 결과값과 정확도가 높은 위치에서 시작된 것을 확인할 수 있었다. 각 반복 계산법 특성에 부합하게 SMART > MART > ART 순으로 수렴되었으며, 이를 통해 계산 속도 및 정확도를 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 Methane/Air 예혼합화염을 비정형의 metal fiber 버너를 통해 연소되며, 발생하는 OH 라디칼 농도를 TDLAS 측정 방법 및 토모그래피 기법을 통해 재구성하였다. 또한 ICCD 카메라로 측정 가능한 OH 라디칼 정성적

강도 결괏값과 비교하였다. 결론적으로 비정형 형성 화염에서 TDLAS & 토모그래피 기법 기반 OH 농도 재구성을 실험적으로 검증한 첫 사례 중 하나로 예상된다.

토모그래피 재구성 기법은 ART, MART, SMART 반복 계산법을 사용하였으며, 회전 각에 따라 농도 값을 측정하고 반복 계산법 종류에 따른 재구성 결과의 장단점을 확인할 수 있었다. 여기서 path 및 cell 증가에 따라 분해능이 증가하고 재구성 과정에 긍정적 영향을 미치는 것을 확인하였다. 분해능 감소에 따라 급격한 각도와 곡면 부분에서 재구성 및 mapping이 명확히 이루어지지 않음을 확인하였으며, 각 반복 계산법에 따른 재구성 차이를 확인하였다. 또한 회전각이 증가할수록 레이저 개수가 감소할수록 분해능이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 비정형 형상의 변과 레이저의 경로가 일부 평행한 경우 재구성이 원활하게 이루어지나, 급격한 각도 변형 및 곡선 형태를 재구성하기 위해서는 레이저를 추가하여 path 및 cell 증가, 분해능 증가 후 재구성 과정이 필요함을 검증하였다.

특히 Fig. 8 회전각 0°에서는 B 구간에서의 재구성이 원활이 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. A, C 구간과 비교하였을 때 B 구간의 경우 x축과 y축 방향으로 투과되는 레이저의 OH 농도에 대한 정보 확보가 많지 않아 재구성 과정이 원활하게 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 반면 Fig. 9, Fig. 10 회전각 30°, 45°에서는 급격히 변하는 각도 영역보다는 오히려 D 구간 곡면 부분에서 원활한 재구성이 이루어지지 않음을 확인하였다. 이 역시 레이저 path의 부재로 인한 정보 획득 미흡으로 판단되며, 비정형 형상에서 mapping은 정형 형상보다 레이저 path 확보가 중요할 것으로 판단되며 즉 보다 정밀한 분해능 확보가 필요할 것으로 사료된다. 따라서 회전 값 통합에 따라 보다 명확한 재구성이 이루어졌으며, 현재 레이저 외 OH 라디칼 농도 측정 방법 부재로 인해 정규화 과정을 거쳐 ICCD 강도값과 SMART 농도 분석값을 비교하여 R² 값을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기술평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(No.20023380).

References

- [1] Yamamoto, K., Ozeki, M., Hayashi, N., and Yamashita, H., 2009, "Burning velocity and OH concentration in premixed combustion", *Proc. Combust. Inst.*, **32**(1), 1227-1235.
- [2] Khalil, A., and Gupta, A., 2014, "Hydroxyl radical distribution in distributed reaction combustion condition", *Fuel*, **122**, 28-35.
- [3] He, L., Guo, Q., Gong, Y., Wang, F., and Yu, G., 2019, "Investigation of OH* chemiluminescence and heat release in laminar methane-oxygen co-flow diffusion flames", *Combust. Flame*, **201**, 12-22.
- [4] Nguyen, Q.V., Edgar, B.L., Dibble, R.W., and Gulati, A., 1995, "Experimental and numerical comparison of extractive and in situ laser measurements of non-equilibrium carbon monoxide in lean-premixed natural gas combustion", *Combust. Flame*, **100**(3), 395-406.
- [5] So, S., Park, J., Yoo, M., Hwang, J., Kim, D., and Lee, C., 2022, "Simultaneous measurement of OH radical, H₂O concentration, and temperature in a premixed CH₄/air flame using TDLAS with an improved analysis method", *Optics Express*, **30**(18), 32031-32050.
- [6] Bao, Y., Zhang, R., Enemali, G., Cao, Z., Zhou, B., McCann, H., and Liu, C., 2020, "Relative Entropy Regularised TDLAS Tomography for Robust Temperature Imaging", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **70**, 4501909.
- [7] Liu, C., Xu, L., Chen, J., Cao, Z., Lin, Y., and Cai, W., 2015, "Development of a fan-beam TDLAS-based tomographic sensor for rapid imaging of temperature and gas concentration", *Optics Express*, **23**(17), 22494-22511.
- [8] Anderson, T.N., Lucht, R.P., Priyadarsan, S., Annamalai, K., and Caton, J.A., 2007, "In situ measurements of nitric oxide in coal-combustion exhaust using a sensor based on a widely tunable external-cavity GaN diode laser", *Appl. Opt.*, **46**(19), 3946-3957.
- [9] Rieker, G.B., Li, H., Liu, X., Liu, J.T.C., Jeffries, J.B., Hanson, R.K., Allen, M.G., Wehe, S.D., Mulhall, P.A., and Kindle, H.S., *et al.*, 2007, "Rapid measurements of temperature and H₂O concentration in IC engines with a spark plug-mounted diode laser sensor", *Proc. Combust. Inst.*, **31**(2), 3041-3049.

- [10] Magnuson, J.K., Anderson, T.N., Lucht, R.P., Vijayasarathy, U.A., Oh, H., Annamalai, K., and Caton, J.A., 2008, "Application of a Diode-Laser-Based Ultraviolet Absorption Sensor for *in Situ* Measurements of Atomic Mercury in Coal-Combustion Exhaust", *Energy and Fuels*, **22**(5), 3029-3036.
- [11] So, S.H., 2016, "A Study on Real-Time Precise Measurement of Combustion Exhaust Gas Using WMS Method", M.S. thesis, Gyeongsang National University, Jinju.
- [12] Gordon, R., Bender, R., and Herman, G.T., 1970, "Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for Three-Dimensional Electron Microscopy and X-ray Photography", *J. Theor. Biol.*, **29**(3), 471-481.
- [13] Jeon, M.G., 2018, "Improvements of measurement technique for temperature and concentration fields using CT-TDLAS", National Research Foundation Korea, <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO202300005849&dbt=TRKO&rn=>.
- [14] Censor, Y., and Segman, J., 1987, "On block-iterative maximization", *J. Inf. Optim. Sci.*, **8**(3), 275-291.
- [15] Bryne, C., 2005, "Choosing parameters in block-iterative or ordered subset reconstruction algorithms", *IEEE Trans. Image Process.*, **14**(3), 321-327.
- [16] Cho, E.-S., 2007, "A Study on the combustion characteristics of flat-plate premixed burner for flame surface medium", *Proc. The Korea Society of Mechanical Engineers Conference*, 19-24.