

様々な濃度勾配中に形成される Triple Flame の特性とその遷移機構

廣田 光 智

論文の内容の要旨

通常高効率燃焼を目指す多くの燃焼器は、燃焼場に乱れを与えることが多い。この場合、その安定性は燃焼場中に存在する火炎端が支配していることが指摘されたが、その詳細な機構は不明である。これは、伝播性を有しない拡散火炎として扱う場合、あるいは伝播性を有する予混合火炎として扱う場合の二つの異なるアプローチがあることが原因である。そこで本研究では、これらの中間的なアプローチとなる部分予混合火炎に着目した。特に二次元的に火炎端を定在させ、その前縁に存在する燃料濃度勾配に着目し、この大きさを急な状態から緩やかな状態へ幅広く変化させることで火炎端近傍の構造変化を明らかにした。このとき形成される火炎は、燃料希薄予混合火炎から燃料過濃予混合火炎へ連続的な弓形の予混合火炎面と、この火炎面で消費しきれない過剰な燃料または酸化剤で形成される後流側の拡散火炎とが共存する Triple Flame と呼ばれるいかり型の特殊なものである。この火炎の詳細な構造と濃度勾配を変化させた際の遷移機構を実験的に明らかにし、実用燃焼機器の安定化制御に貢献することを目指した。

実験に使用するバーナは、4～6セクションの同一セクションが並列に配置された矩形型の二次元火炎形成用バーナである。各セクションに流入させる混合気濃度(メタン・空気)を変化させて任意の直線的な濃度勾配を実現し、テストセクションの減速流中に二次元の Triple Flame を定在させた。本研究では設定される濃度勾配を表す指標として混合分率の幅方向勾配 $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean})$ を定義した。 Z_{rich} は過濃可燃限界の混合分率、 Z_{lean} は希薄可燃限界の混合分率、 x_{rich} 、 x_{lean} は測定された濃度分布から求めた可燃限界位置である。本研究では設定する濃度勾配範囲を $2.0 \text{ m}^{-1} < (Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) < 131.7 \text{ m}^{-1}$ とした。この濃度勾配範囲において炎光法による OH ラジカル自発光強度、粒子画像流速測定法による速度分布、及びレーザトモグラフィによる火炎前縁の熱構造を明らかにした。

OH ラジカル発光強度の計測から、比較的緩やかな濃度勾配を設定した場合の火炎先端領域では、Triple Flame は濃度勾配が緩やかなほど燃焼反応が活発であることがわかった。この振る舞いは推定最大発熱量の変化(燃焼強度の変化)により現れる現象として説明できた。この OH ラジカル発光強度と推定最大発熱量は、濃度勾配 $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) > 3 \text{ m}^{-1}$ 付近まで強く関連していることがわかった。これよりもさらに緩やかな設定では、推定最大発熱量の変化と OH ラジカル発光強度の変化が追従せず、燃焼強度にばらつきが生じて、不安定な状態となった。この $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) < 3 \text{ m}^{-1}$ 付近を領域 I と定義した。

濃度勾配が急なとき拡散火炎は過濃予混合火炎に寄って形成された。火炎前縁の熱構造の変化が

ら、 $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) > 75m^{-1}$ 付近を境にさらに濃度勾配の急な設定では予混合火炎面の反応が活発であることがわかった。この特徴を持つTriple Flameは、従来の発熱量に追従した特性を持つTriple Flameとは区別できる特殊な構造をもつといえる。このとき濃度勾配が $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) > 75m^{-1}$ 付近の場合、理論的に求めた次元の層流予混合火炎の特性値との比較から燃焼強度が強くなることがわかった。火炎間の相互干渉が強くなる特殊な扱いをすべき領域へ遷移しているこの $(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) > 75m^{-1}$ 付近を領域Ⅲと定義した。

領域Ⅰと領域Ⅲの間にあたる $3m^{-1}$ 付近 $< (Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) < 75m^{-1}$ 付近を領域Ⅱとして定義した。この領域のTriple Flameの燃焼速度は、火炎伸張の効果、Le数、曲率の影響などを考慮した理論式から導き出した燃焼速度よりも明らかに大きかった。これは予混合火炎面と後流側の拡散火炎との熱的相互干渉の影響が存在していることが原因で、予混合火炎面に沿う未燃混合気の局所当量比から温度分布を検討した結果、後流側拡散火炎から予混合火炎面への熱の流入があることがわかった。また濃度勾配が急なほど熱の流入が増加し、燃焼強度が強くなることがわかった。

以上要するに本研究では火炎端の特性は濃度勾配の変化に対して三つの領域に分けて説明できることを示した。すなわち領域Ⅰ ($(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) < 3m^{-1}$ 付近)は、火炎特性が発熱量に追従しない、予混合火炎面と拡散火炎の相互干渉が弱くなるような不安定な領域として取り扱いをすべきTriple Flameの存在範囲、領域Ⅱ ($3m^{-1}$ 付近 $< (Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) < 75m^{-1}$ 付近)は、濃度勾配の大きさの変化に対して発熱量の変化に追従したTriple Flameの火炎特性変化が見られ予混合火炎面と拡散火炎との相互干渉が常に作用しているTriple Flameの存在範囲、領域Ⅲ ($(Z_{rich} - Z_{lean}) / (x_{rich} - x_{lean}) > 75m^{-1}$ 付近)は、予混合火炎面と拡散火炎間の相互干渉が強くなり流れ構造や熱構造などが変化して特殊な構造へ移行する、燃焼強度が発熱量に追従しないTriple Flameの存在範囲として定義した。燃焼の安定性を考慮すると工業的には領域Ⅱと領域Ⅲが適切な燃焼範囲として扱うことができる。

以上