Experimental study of autoignition and extinction of DME diffusion flames in nonuniform flows

○ 学 梅田純司 (大分大学院), 学 三重野渉 (大分大学院), 学 宮原朋広 (大分大学院)
正 田上公俊 (大分大学), 正 嶋田不美生 (大分大学)

Junji Umeda, Oita Univ. Wataru Mieno, Oita Univ. Tomohiro Miyahara, Oita Univ.

Kimitosi Tanoue, Oita Univ. Fumio Shimada, Oita Univ.

Key Words : DME, Autoignition, Extinction, Diffusion Flame

1. 緒論

現在の内燃機関の設計は、地球環境問題とエネルギー資源枯渇問題から、低公害なエネルギー燃料の利用と高効率な燃焼技術が求められている^{(1)~(3)}。軽油代替燃料として、注目されているジメチルエーテル (以下、DMEと示す) は最も低分子のエーテルであり、毒性もメタノールに比べてかなり低く、沸点が -25°C であることから、早い混合気の形成、着火遅れの低減、良好な始動特性を有し、さらにセタン価が55から60であることから、ディーゼル燃料として良好な自着火特徴^{(4)~(6)}を有する。また、含酸素燃料で炭素同士の結合がないことから無煙な燃焼であり、同時にEGRによる燃焼温度制御により NO_x の削減も期待できる。

一般に、ディーゼル機関内の燃焼は拡散燃焼が支配的とされるため、DMEを実機に適用する場合、その拡散燃焼特性を把握する必要がある。そこで、本研究では対向流バーナによる実験と数値計算により非一様流中でのDME火炎の基礎的な着火及び消炎特性を調べる。ここでは燃焼温度、不活性ガス種、火炎構造、火炎伸張などが着火及び消炎特性にどのような影響を及ぼすかを実験的に調べると共に、詳細化学反応を用いた数値計算と比較して、反応機構の妥当性を検証する。

2. 実験装置および方法

2.1 対向流バーナ実験装置および実験方法

本研究で使用する対向流バーナ実験装置は、過去の研究^{(7)~(10)}と同じであり、上下2つのノズルから酸化剤、燃料が噴射され、バーナ上部と下部の間によどみ面を形成し、対向流火炎を形成する装置である。

実験Ⅰでは上下のノズルから酸化剤、燃料を噴出し火炎を形成後、火炎伸張を変化させながら火炎を観察し、消炎する条件を特定した。また、実験Ⅱ、Ⅲでは酸化剤と燃料を流した状態でバーナの温度を上げていき、着火する酸化剤温度を観察した。

2.2 火炎伸張率

本研究で用いる火炎伸張率 $a_2^{(11)}$ を次のように表す。

$$a_2 = \frac{2|V_2|}{L} \left(1 + \frac{|V_1|\sqrt{\rho_1}}{|V_2|\sqrt{\rho_2}} \right) \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1)$$

ここで、 V は流速、 ρ は流体の密度である。添字1, 2はそれぞれ酸化剤、燃料を示す。 L はトップとボトムの管の間隔である。本研究ではトップとボトムの管の間隔は実験Ⅰでは $L=8\text{mm}$ 、実験Ⅱ、Ⅲでは $L=10\text{mm}$ にした。また、上下の流体の運動量を揃え、よどみ面がバーナ間の中心にできるようにするために、 $\rho_1 V_1^2 = \rho_2 V_2^2$ としている。

2.3 火炎パラメータ

火炎構造の指標になる mixture fraction Z は次式で示される。

$$Z = \frac{Y_F/W_F v_F + (Y_{O,\infty} - Y_O)/W_O v_O}{Y_{F,\infty}/W_F v_F + Y_{O,\infty}/W_O v_O} \quad (2)$$

このとき、 Z は mixing layer 内の相対位置を示し、酸化剤側で0、燃料側で1となる。ここで、 Y は質量分率、 W は分子量、 v はストイキのモル数である。添字O, Fは酸化剤、燃料を表す。酸化剤ノズル出口での質量分率を $Y_{O,\infty}$ 、燃料ノズル出口での質量分率を $Y_{F,\infty}$ とする。また、火炎位置は以下の Stoichiometric mixture fraction Z_{st} で特徴付けられる⁽¹²⁾

$$Z_{st} = 1 / \left(1 + \frac{Y_{F,\infty} \cdot W_O \cdot v_O}{Y_{O,\infty} \cdot W_F \cdot v_F} \right) \quad (3)$$

2.4 数値計算手法

本研究では、数値計算手法として西岡らが開発した1次元対向流火炎の計算コード⁽¹³⁾を使用した。本コードは Sandia National Laboratories で開発された CHEMKIN⁽¹⁴⁾のサブルーチンを使い詳細な化学反応機構を用いた解析を行うことができる。本研究では本コードを用いて Flame-Controlling Continuation method のより消炎条件を特定した。支配方程式、解法などの詳細は文献⁽¹³⁾を参照。支配方程式中のDMEの反応機構はCurranらの詳細反応機構⁽¹⁵⁾を使用した。また、火炎温度の算出のための平衡計算には Reynolds などによって開発された STANJAN に基づく EQUIL⁽¹⁴⁾を使用して計算した。さらに、本研究で利用した各熱物性および輸送係数は CHEMKIN⁽¹⁴⁾から算出した。

3. 実験および考察

3.1 消炎に及ぼす不活性ガス種の影響(実験Ⅰ)

本研究ではまず、消炎に及ぼす不活性ガス種の影響を調べるため、DMEと C_3H_8 を用いて火炎温度を一定にし、火炎構造を変化させる消炎実験を行った。本研究ではまず、燃料側に N_2 を添加し、断熱火炎温度を減少させた基準混合気を作成した。断熱火炎温度はDMEでは $T_{ad}=2050\text{K}$ 、 C_3H_8 では $T_{ad}=2152\text{K}$ とした。基準混合気に対して火炎温度一定にし、 Z_{st} を変化させるため、各混合気の組成を保持したまま、酸化剤側と燃料側の窒素量を調節し、その他の燃料組成を決定した。また、このときの火炎温度と等しくなるように N_2 を CO_2 に置換し、添加した場合も測定した。

図1に消炎実験における、消炎時の断熱火炎温度 T_{ad} と消炎時の火炎伸張率 $a_{2,E}$ の関係を示す。図から、両燃料とも添加する気体に関係なく火炎温度の増加に伴い消炎時の火炎伸張率が増加することが分かる。火炎伸張が増加すると、酸化剤と燃料の濃度勾配が増加し、火炎近傍での拡散時間が減少する。化学反応時間を一定とすると、両者の比で定義されるダムケラー数は減少し、消炎に至る。このような非平衡現象を表すパラメータとして、スカラー消散率が定義されている。火炎伸張が増大すると、スカラー消散率も増加すると考えられることから、消炎時の拡散特性時間の短い、即ち、スカラー消散率や火炎伸

張率が大きい火炎ほど消炎しにくい火炎といえる。また、 CO_2 を添加した火炎の方が N_2 を添加した火炎に比べ、両燃料とも火炎温度は同一であるのに、消炎時の火炎伸張率は高くなっている。このことから、 CO_2 の添加により耐消炎特性が向上したことが分かる。これは CO_2 で希釈することで混合気温度伝導率が低下し、火炎伸張を受けた場合の温度低下が少なくなるためと推察される。

Fig.1 Adiabatic flame temperature as a function of the strain rate at extinction, for CO_2 diluted flames.

3.2 着火に及ぼす燃料質量分率の影響(実験Ⅱ)

次に本研究では火炎伸張を一定にし、燃料質量分率を変化させ、着火における燃料質量分率の影響を調べた。酸化剤には空気、燃料には DME と C_3H_8 を用い、火炎伸張は $a_2=150(\text{s}^{-1})$ で一定とした。質量分率は燃料に N_2 を添加することで変化した。

図2に着火時の空気温度と燃料質量分率の関係を示す。両燃料とも燃料濃度が増加するにつれて着火しやすくなっているのが分かる。また、同一燃料質量分率のとき DME より C_3H_8 のほうが着火しやすいことが分かった。一般に C_3H_8 より DME の方が自着火温度が低いことが知られているが、非一様流中では拡散の影響により C_3H_8 が着火しやすい結果となった。

Fig.2 The temperature of air at autoignition as a function of the fuel mass fraction, Y_F , at a fixed strain rate of $a_2=150\text{s}^{-1}$.

3.3 着火に及ぼす火炎伸張の影響(実験Ⅲ)

さらに、DME と C_3H_8 を用いて燃料モル分率を $X_F=0.15$ に固定し、火炎伸張による着火の影響を観察した。

図3に着火時の空気温度と火炎伸張の関係を示す。 C_3H_8 に関する今回の実験値と Humer らのデータ⁽⁷⁾と比較すると定性的に一致しているため、今回の実験は一般性を有

すると考えられる。図から、両燃料とも火炎伸張率が増加するにつれて着火しにくくなっている。これは、火炎伸張が増加すると拡散が支配的になるため着火しにくくなったと考えられる。また、この実験においても実験Ⅱと同様に DME より C_3H_8 のほうが着火しやすいことが確認された。

Fig.3 The temperature of air at autoignition, T_{ig} , as a function of the strain rate.

4. 結論

- (1) 不活性ガス N_2 を CO_2 に置換した混合気を用いて実験を行い比較した結果、 CO_2 希釈の場合が消炎しにくいことが分かった。これは CO_2 で希釈することで混合気温度伝導率が低下し火炎伸張を受けた場合の温度低下が小さくなるためと推察される。
- (2) DME と C_3H_8 の着火を比較すると、燃料の質量分率が等しい場合、もしくは火炎伸張率が等しい場合、DME より C_3H_8 のほうが着火しやすいことが分かった。一般に C_3H_8 より DME の方が自着火温度が低いことが知られているが、非一様流中では拡散の影響により C_3H_8 が着火しやすい結果となった。

参考文献

- (1) Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 930p, 1988.
- (2) Bradley, D., Lawes, M., and Sheppard, C.G. W., Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.214, PartC, p.257-268, 2001.
- (3) Takagi, Y., Proc. Combust. Inst. 27, p.2055-2068, 1998.
- (4) Kajitani, S., JSME TED Newsletter, No.42, 12p, 2004.
- (5) B. J. Hansen, et al., Soc. Am. Engrs. Paper SAE-950063.
- (6) Larson, E. D. Tingjin R., Energy Sustain, Develop. VII(4), p.2-44, 2003.
- (7) Humer, S., Seiser, R. and Seshadri, K., Proc. Combust. Inst., Vol.29, p.1597-1607, 2002.
- (8) Seiser, R., Ph. D Thesis, Technical University of Graz, 2000.
- (9) Payer, W., Diploma Thesis, Vienna University of Technology, 2002.
- (10) Geieregger, M., Diploma Thesis, Vienna University of Technology, 2003.
- (11) Seshadri, K. and Williams, F.M., Int. J. Heat Mass Transfer 21, p.251-253, 1978.
- (12) Chen, R., Axelbaum, R.L., Combust. Flame, 142, p.62-71, 2005.
- (13) Nishioka, M., Law, C.K., Takeno, T., Combust. Flame, 104, p.328-342, 1996.
- (14) Kee, R.J. Rupley, F.M., and Miller J.A. et al., CHEMKIN Collection, Release 3.7, Reaction Design, Inc., San Diego, CA, 2003.
- (15) Kaiser, E.W., et al., Int. J. Phys. Chem. 3A104, p.8194-8206, 2000.