Effects of Pressure on Markstein Number, Instabilities of Premixed Flame and its Turbulent Flame Propagation

北川 敏明 (九州大), 永野 幸秀 (九州大), ○恒吉 幸策 (九州大), 片岡 俊介 (九州大)

Toshiaki KITAGAWA, Hideyuki NAGANO, Kosaku TSUNEYOSHI and Shunsuke KATAOKA

Key Words: Premixed Combustion, Turbulent Flame, Flame Instability, Effects of Pressure

1. ま え が き

実用上, エンジン内などでは高圧下で燃焼が行われているにもかかわらず, 予混合気の燃焼特性に及ぼす圧力の影響についての研究は少ない. そのなかで, Kobayashi ら⁽¹⁾⁽²⁾は, バーナー火炎を用いて, 燃焼速度や不安定性についての詳細な検討から, 層流および乱流火炎への圧力の影響を示している.

北川⁽³⁾の球状伝播層流火炎による研究では, 燃焼速度に及ぼす火炎伸長の影響が, 圧力により著しく変化することが明らかとなった. Markstein 長さ⁽⁴⁾⁽⁵⁾は, 同一混合気においても圧力により大きく変化する. また, 圧力が高くなると, 火炎の不安定性が顕著となる.

さらに, 乱流伝播火炎についても, Bradley と Kitagawa ら⁽⁶⁾が示すように, 乱流火炎も圧力の影響を受けている. このように, 圧力は予混合火炎の挙動に大きな影響を及ぼしており, より詳細に把握する必要がある.

そこで, 本研究では, 球状伝播層流火炎に及ぼす圧力の影響を調べた結果⁽³⁾をもとに, 乱流燃焼特性に及ぼす圧力の影響を, プロパン-空気予混合気について検討した.

2. 実験装置および方法

実験には, 定容燃焼容器⁽³⁾を用いた. 燃焼室内の上下にはファンが取り付けられており, これにより, 混合気に乱れを生成する. 燃焼室中心付近での乱れ強さ u' は, 0.80 および 1.59 m/s とした. 乱れの積分スケール L_f は, 乱れ強さ, 混合気圧力によらずほぼ一定で, 1.2 mm である.

混合気を所定の圧力で充填後, ファンを回転させながら, 燃焼室中心で点火を行った.

燃料はプロパンとし, 混合気の当量比 ϕ は, 0.8, 1.0 および 1.3 の3とおりとした. 燃焼前の混合気初期圧力 P_i は, 0.10, 0.25, 0.50 MPa とした. また, 混合気初期温度は, 全ての条件において 298 K とした.

これらの条件における, 既報⁽³⁾の層流燃焼実験より求めた火炎が伸長を受けていないときの層流燃焼速度 u_l , Markstein 長さ L と Markstein 数 Ma を, 表 1 に示す. δl は, 層流火炎厚さである.

プロパン混合気においては, 当量比が大きくなるにつれて, Markstein 数 Ma が小さくなる.

そして, いずれの当量比においても, 圧力が高くなるにつれて, 層流燃焼速度および Markstein 数は小さくなっている⁽³⁾.

3. 実験結果および考察

3.1 層流火炎の不安定性 層流火炎のシュリーレン写真を, 図 1 に示す. 当量比 ϕ が大きくなるにつれて, また, 混合気圧力が高くなるにつれて, 火炎の不安定性が顕著となる. この火炎が不安定となる条件は, Markstein 数が小さい場合と一致しており, 火炎表面にしわが形成される時期が早くなるとともに, しわの間隔が小さい⁽³⁾.

Fig. 1 Schlieren images of laminar flames

3.2 乱流燃焼速度 乱流燃焼実験においては, 乱流火炎のシュリーレン像の面積と等しい円の半径を, この乱流火炎の半径とし, その時間変化より乱流燃焼速度 u_{tn} を求めた.

図 2 に, 乱流燃焼速度と火炎が伸長を受けていないときの層流燃焼速度の比 u_{tn}/u_l の, 点火からの時間変化を示す.

点火から同一の時間での比較においては, いずれの乱

P_i [MPa]	ϕ	u_l [cm/s]	L [mm]	Ma	δl [mm]
0.10	0.8	25.4	0.297	3.64	0.082
	1.0	36.7	0.177	3.18	0.056
	1.3	33.8	0.077	1.31	0.059
0.25	0.8	21.3	0.131	3.37	0.039
	1.0	30.3	0.070	2.61	0.027
	1.3	24.3	-0.030	-0.92	0.033
0.50	0.8	17.7	0.078	3.35	0.023
	1.0	24.8	0.042	2.57	0.016
	1.3	19.4	-0.039	-1.87	0.021

Table 1 Measured unstretched laminar burning velocity, u_l and Markstein number, Ma

れ強さにおいても、当量比が大きくなるにつれて、 u_{tn}/u_l は大きくなっている。そして、 u_{tn}/u_l は、いずれの当量比においても、圧力が高くなるにつれて大きくなっている。

火炎が伸長を受けていないときの層流燃焼速度 u_l は、圧力が高くなるにつれて小さくなるにもかかわらず、このような比較においては、乱流燃焼速度 u_{tn} が圧力の増大により小さくなることはなかった。Kobayashi ら⁽¹⁾のメタン混合気においても、乱流燃焼速度は圧力によりあまり変化しない。

また、図 2(a) と (b) の比較から、乱れ強さが大きい方が、乱流燃焼速度は大きいことがわかる。

当量比および圧力の増大につれて、 u_{tn}/u_l は大きくなるが、表 1 に示すように同様の条件において、Markstein 数 Ma は小さくなる。 u_{tn}/u_l の変化には、熱-拡散効果が影響を及ぼしているものと考えられる。

さらに、この Markstein 数 Ma が小さく u_{tn}/u_l が大きい場合は、図 1 に示すように、火炎の不安定性が顕著となる。このとき、火炎のセル状化により燃焼速度が増大する⁽³⁾。

層流火炎においては、Markstein 数が小さくなるにつれて、火炎伸長による火炎の安定化作用が小さくなり、火炎の流体力学的な Darrieus-Landau 不安定性⁽⁵⁾を抑制できなくなり、火炎の不安定性が顕著となると考えられる⁽⁷⁾。そして、Markstein 数が負の値となるような場合には、熱-拡散効果も火炎の不安定要因となる。

乱れ強さ $u' = 0.80 \text{ m/s}$ の場合の乱流火炎のシュリーレン写真を、図 3 に示す。圧力が高くなるにつれて、像の縞が密になっており、火炎面に小さなスケールの凹凸が形成されているものと考えられる。これにより、火炎面積が増大しているものと考えられる。

4. 結 論

混合気圧力が高くなるにつれて、火炎が伸長を受けていないときの層流燃焼速度 u_l は小さくなるにもかかわらず、乱流燃焼速度 u_{tn} が小さくなることはなかった。また、 u_{tn}/u_l は、当量比および圧力の増大につれて、大きくなっ

Fig. 2 Turbulent burning velocity, u_{tn}

Fig. 3 Schlieren images of laminar flames

た。これは、Markstein 数の減少、火炎の不安定化の傾向と一致する。

文 献

- (1) Kobayashi, H., Tamura, T., Maruta, K., Niioka, T. and Williams, F.A., Proc. Combustion Institute, 26, (1996), 389-396
- (2) Qin, X., Kobayashi, H. and Niioka, T., Experimental Thermal and Fluid Science, 21, (2000), 58-63
- (3) 北川, 戸上, 原田, 小川, 日本機化学会論文集, 70-696, B(2004), 2197-2204
- (4) Clavin, P., Progress in Energy and Combustion Science, 11, (1985), 1-59
- (5) Williams, F.A., 拓殖俊一訳, 燃焼の理論, 日刊工業新聞社, 1987, p.369.
- (6) Bradley, D., Haq, M.Z., Hicks, R.A., Kitagawa, T., Lawes, M., Sheppard, C.G.W. and Wooley, R., Combustion and Flame, 133, (2003), 415-430
- (7) Bradley, D., Sheppard, C.G.W., Woolley, R., Greenhalgh, D.A. and Lockett, R.D., Combustion and Flame, 122, (2000), 195-209.