Effects of Pressure on Markstein Length of Laminar Flame

機一正 北川敏明 (九大工)
雑賀俊二 (九州大)

小川知美 (九大院) ○ 永野幸秀 (九大院)
成瀬裕一 (九州大)

Toshiaki KITAGAWA*, Tomomi OGAWA*, Yukihide NAGANO*,
Shunji SAIGA* and Yuichi NARUSE*

*Department of Mechanical Engineering, Kyushu University

1. まえがき

一般的にエンジン内などでの燃焼は高圧下で行われているが、高圧下での予混合気の燃焼特性に関する研究は非常に少ない。地球環境保全、エネルギー資源有効利用の観点から高圧下での燃焼特性をより詳細に把握することが必要である。

火炎面が曲率や流れの速度勾配による歪みを有している場合、火炎は伸長を受ける。火炎が伸長を受けると、一般的には燃焼速度は変化する。この伸長による燃焼速度の変化の特性は、Markstein 長さにより表される。また、この Markstein 長さは圧力により大きく変化し、圧力依存性を示す。

この Markstein 長さが圧力に依存するということを考慮すると、層流燃焼速度そのものも圧力により変化するため、ふたつの意味で圧力依存性を有することになる。

そこで、本研究では Markstein 長さをを用い、メタン及びプロパン-空気予混合気の層流火炎の燃焼速度、Markstein 長さが燃料の種類、燃料濃度など混合気種類によりどのように変化するか調べるとともに、これらに及ぼす圧力の影響について調べた。

2. Markstein 長さ

火炎が伸長を受けていないときの層流燃焼速度を u_l 、球状層流火炎の燃焼速度を u_n とすると、火炎の受けている伸長率が α のとき、火炎伸長による層流燃焼速度の変化量は、式(1)のように火炎伸長率 α に比例するとしてよく(1)-(4)、このときの L が Markstein 長さである。

$$u_l - u_n = L \cdot \alpha \quad (1)$$

3. 実験装置および実験方法

本研究では、定容容器内に所定の圧力で充填された予混合気に火花点火を行い、球状伝播する火炎について解析を行った。

燃焼室は、内径 265mm の 3 つの円筒の直交相貫体の形状となっている。点火電極は直径 1.8mm のステンレス棒を使用し、燃焼室中心で点火している。また、燃焼容器に石英ガラス観測窓を 2 枚取り付けることにより、直径 16cm の視野のシュリーレン像が得られる。

混合気は、混合気組成に基づく分圧充填法により燃焼室に充填し、所定の燃料濃度及び圧力となるようにした。層流燃焼とするため、ファンで攪拌して均質混合気としたの

ち、充分時間をおき混合気が静止してから点火を行った。

混合気の当量比 ϕ は、いずれの燃料においても 0.8 から 1.4 まで 0.1 おきに变化させた。燃焼前の混合気初期圧力は絶対圧力で、0.10, 0.25, 0.50MPa とし、混合気初期温度は、全ての条件で 298K とした。

本実験では、燃焼時の燃焼室内圧力の測定と同時に撮影を行った。

4. 実験結果及び考察

図 1 に、混合気初期圧力が 0.10, 0.25 及び 0.50MPa の場合の、伸長を受けていないときの層流燃焼速度 u_l を示す。また、図 2 に各混合気の Markstein 長さ L を示す。

(a) Methane-air mixture (b) Propane-air mixture

Fig.1 Unstretched laminar burning velocity, u_l

(a) Methane-air mixture (b) Propane-air mixture

Fig.2 Markstein length, L

4. 1 当量比による Markstein 長さ L の変化

図 1, 図 2 から、伸長を受けていない層流燃焼速度 u_l と Markstein 長さ L は当量比に対して異なる依存性を示している事がわかる。

メタン混合気において Markstein 長さ L は、燃料濃度が

希薄から過濃になるにつれて大きくなっている。このことは、火炎伸長を受けた場合の燃焼速度変化が、希薄、過濃の両混合気間では異なることを示している。メタン混合気の場合、伸長による燃焼速度の低下が、希薄時に小さく、過濃時に大きい。

一方、プロパン混合気では、燃料濃度が希薄から過濃になるにつれ Markstein 長さ L は小さくなった。伸長による燃焼速度低下は、希薄時に大きく、過濃時に小さい。

以上のように、燃焼速度変化に及ぼす火炎伸長の影響は、燃料の種類、当量比で大きく異なってくる。

4. 2 圧力が Markstein 長さ L に及ぼす影響

図 1, 図 2 より、いずれの燃料、当量比においても、混合気初期圧力が高くなると、伸長を受けていない層流燃焼速度 u_l , Markstein 長さ L ともに小さくなっている。

図 3 に両混合気の Markstein 数 Ma を示す。この Markstein 数 Ma は式 (1) を層流火炎厚さと u_l で無次元化することによって以下のように求められる。

$$\frac{u_l - u_n}{u_l} = K \cdot Ma \quad (2)$$

ここで、 K は火炎伸長度である。

(a) Methane-air mixture (b) Propane-air mixture

Fig.3 Markstein number, Ma

Fig.4 Schlieren images of spherically propagating flames

メタン及びプロパン混合気ともに、混合気初期圧力が高くなるにつれて、Markstein 長さ L と同様に、Markstein 数 Ma も小さくなる。このことから、混合気初期圧力が高くなると、火炎伸長を受けないときの層流燃焼速度そのものは低下するが、火炎伸長を受けたときのそこからの燃焼速度低下は小さいことがわかる。

図 4 にプロパン-空気混合気のシュリーレン写真を示す。図 4 は当量比 0.8, 1.3, 混合気初期圧力が 0.10, 0.25, 0.50 MPa の場合の、火炎直径が約 130 mm となったときのシュリーレン写真である。

シュリーレン写真により以下のことが観察された。

プロパン混合気では、当量比が大きくなるにつれて、すじの発生時期が早くなる。そして、混合気初期圧力が高くなるにつれて、その時期は早くなり、形成されるセルも小さくなる。

メタン混合気においては、当量比が小さくなるにつれて、すじの発生時期が早くなる。また、プロパン混合気と同様に、混合気初期圧力が高くなるにつれて、その時期は早くなるとともに、形成されるセルの大きさが小さくなる。

また図 3, 図 4 から、Markstein 数 Ma が著しく負の値をとるプロパンの当量比 1.3, 混合気初期圧力 0.25, 0.50 MPa では、火炎全体がスケールの小さなセルで覆われていることがわかる。

このことから、Markstein 数 Ma が小さいとき、火炎の不安定性が重要となると考えられる。

5. 結論

定容容器内を球状伝播する予混合層流火炎を用いて、容器内圧力より、伸長を受けないときの層流燃焼速度 u_l 及び Markstein 長さ L を求めた。結果、当量比が大きくなるにつれて、Markstein 長さ L がメタン混合気では大きくなり、プロパン混合気では小さくなることがわかった。

そして、メタン及びプロパン混合気ともに、混合気初期圧力が高くなるにつれて、層流燃焼速度 u_l だけではなく Markstein 長さ L までも小さくなることが明らかになった。さらに、混合気初期圧力 0.50 MPa においては、メタンの希薄及び化学当量混合気、プロパンの過濃混合気の Markstein 長さ L が負の値となっている。

このことから、混合気初期圧力が高くなると火炎伸長を受けないときの層流燃焼速度 u_l そのものが低下するとともに、火炎伸長を受けたときのそこからの燃焼速度の変化も大気圧下と比べて異なることが明らかとなった。

また、火炎の不安定性に関して、混合気圧力が高くなるにつれて、火炎にすじが形成される時期が早くなり、形成されるセルの大きさが小さくなることが明らかになった。

文献

- (1) Searby, G. and Quinard, J., Direct and Indirect Measurements of Markstein Numbers of Premixed Flames, *Combustion and Flame*, 82, (1990), 298-311.
- (2) Kwon, S., Tseng, L.-K. and Faeth, G.M., Laminar Burning Velocities and Transitions to Unstable Flames in $H_2/O_2/N_2$ and $C_3H_8/O_2/N_2$ Mixtures, *Combustion and Flame*, 90, (1992), 230-246.
- (3) Clavin, P., Dynamic Behavior of Premixed Flame Fronts in Laminar and Turbulent Flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, 11, (1985), 1-59.
- (4) Williams, F.A., 柘植俊一訳, 燃焼の理論, 日刊工業新聞社, 1987, p. 369.