

이 論文은 1981年度 文敎部 學術研究 助成費에 依하여 研究되었음.

高速噴出火炎이 燃燒에 미치는 影響에 關한 研究 (A Study of Turbulent Jet Flame Effects on Combustion)

鄭景晫* · 鄭仁碩** · 金應瑞** · 趙慶國**

(K. S. Jeong · I. S. Jeong · E. S. Kim · K. K. Cho)

Abstract

To understand the effects of turbulence on combustion, it was experimentally investigated in the combustion chamber with sub-chamber by using pressure record and high speed Schlieren motion picture.

The results show that turbulence can increase the flame propagating rate and there exists a condition under which the total burning time becomes the minimum. And it was also found that there exist three kinds of flame propagating pattern and the total burning time can be reduced with the appropriate selection of sub-chamber size and orifice diameter.

記 號

- V_s : 副燃燒室의 體積
- V_m : 主燃燒室의 體積
- V_s/V_m : 副燃燒室의 主燃燒室에 對한 體積比
- d : 오리피스 直徑
- L_x : 오리피스로부터 點火位置까지의 距離
- L_s : 오리피스로부터 副燃燒室 바닥까지의 距離
- M. R. : 프로판-空氣 體積 混合比
- P : 極大값을 갖는 點
- E : 終了에 해당하는 點

그 가운데에서 稀薄燃燒方式이 매우 有用한 方法으로 생각되고 있다. 그러나 이 燃燒方式에는 點火性能이 나쁘며 火災傳播速度가 낮고 燃燒가 不安定하다는 문제가 있다. 이러한 實用上의 문제를 개선하기위해 여러 종류의 研究가 進행되었다.

稀薄混合氣의 點火性能을 向上시키기 위해 三田等⁽¹⁾에 의한 2極 接地形 點火 플러그를 이용하는 方法 및 吳等⁽²⁾에 의해 反復點火하는 方法이 研究되었고 이들 方法에 의하면 可燃限界를 상당히 擴張할 수 있었다.

또 火災傳播速度를 빠르게 하는 方法으로는 燃燒室內에 亂流를 發生시키는 것이 매우 有用한 것으로 알려져 있다. M. W. Evans⁽³⁾ 등은 燃燒室內에 그리드(Grid)를 설치해 亂流를 發生시켰고 三田等은 T. G. P. (Turbulence Generating Pot)를 설치하였다. 또 燃燒室을 主燃燒室과 副燃燒室로 分割하여 副燃燒室에서 點火하거나⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

1. 序 論

최근 에너지보존과 大氣汚染문제가 심각해짐에 따라 自動車 및 航空機機因에 있어서도 이를 위한 여러 가지 對策 技術이 講究되고 있으며,

* 서울大學校 工科大學

** 正會員 서울大學校 工科大學

副燃燒室쪽을 過濃混合氣로 하여 成層燃燒시키는⁹⁾ 이른바 副燃燒室이 있는 燃燒室에서 稀薄混合氣를 빠르고 安定되게 燃燒시키는 기초적인 研究도 進行되어 그 結果가 發表되고 있다.

그런데 이같은 燃燒機構의 解析은 密閉空間內에 非定常亂流가 있기 때문에 理論的 解析이 어렵고 實驗結果의 解析에도 이러한 亂流를 고려해야만 한다. 때문에 이런 종류의 燃燒室內의 燃燒機構解析에 統一된 見解를 얻지 못하고 있다.

本 研究에서는 主燃燒室은 一定하게 두고 副燃燒室의 體積을 變化시키면서 主燃燒室과 副燃燒室을 連結하는 오리피스 크기와 点火位置를 變化시켜 各 條件에서의 燃燒形態를 高速度 ฟิล름寫眞으로 撮影하여 觀察하고 主·副燃燒室의 壓力를 測定하여 燃燒機構를 調査하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

Fig. 1은 亂流火災의 特性과 그 現象을 觀察하기 위하여 제작한 燃燒室을 나타낸다. 燃燒室은 가로 50mm, 세로 50mm, 높이 200mm의 四角柱形으로 하였고 材料는 아크릴로 하였다. 燃燒室을 오리피스形 噴出口가 있는 黃銅平板으로 主燃燒室과 副燃燒室을 體積比 3:1로 分割하고, 副燃燒室의 中央에서 点火할 수 있도록 直徑 1mm의 피아노鋼線製의 針端形 点火플러그를 설치하였다. 또 主燃燒室과 副燃燒室으로 分割하는 平板은 각각의 오리피스가 있는 것으로 바꿀 수 있도록 하였고 오리피스의 直徑은 3mm, 5mm, 7mm 및 10mm의 4種類로 하였다.

副燃燒室에는 알루미늄製 불록을 넣어 所要되는 副燃燒室의 體積을 얻을 수 있도록 하였고, 副燃燒室의 體積(V_0)은 主燃燒室 體積(V_m)에 對해 $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ 및 $\frac{1}{10}$ 의 4種類로 하였다.

点火位置의 影響의 觀察에서는 $V_0/V_m = \frac{1}{2}$ 로 하고 点火位置는 오리피스로부터 副燃燒室 바닥까지 거리의 $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ 및 $\frac{1}{10}$ 인 곳으로 하고, 点火플러그 間隙은 1mm로 하였다.

燃燒室의 前後面에는 寫眞撮影을 위하여 두께 20mm의 유리창을 설치하고 燃燒室面과 유리창 사이에는 O-ring으로 氣密이 維持되도록 하였다.

点火 코일은 市販의 것을 사용하였고 点火方

式은 容量放電形 点火裝置(Capacitor Discharge Igniter, CDI)를 사용하였다. 燃燒室 兩側面에는 吸氣用 排氣用 코크와 스트레인 제이지 방식의 壓力變換器를 설치하였고 壓力變換器의 出力은 增幅器를 통하여 메모리 스크우프에 기록되도록 하였다.

燃料과 空氣의 混合은 通常의 均一豫混合氣製造裝置를 사용하였으며 사용한 燃料은 市販의 프로판 가스이고 混合비는 프로판 空氣 體積混合比로 표시하였다.²⁾

Fig. 2는 全体 實驗 機構의 構成圖이다. 眞空狀態의 燃燒室에 均一豫混合氣를 大氣壓상태로 充填시킨 다음, 원격스위치를 작동시키면 高速度카메라가 작동되고, 또 同期回路에 의해 CDI 点火裝置가 副燃燒室內의 混合氣에 点火를 한다 외부同期信號로 点火信號가 入力됨에 따라 스크오프가 作動하여 燃燒室內의 壓力이 기록된다.

술리렌光學 裝置의 配置는 平面 Z字形으로 하였으며, 光軸의 오프 액시스角(Off-Axis Angle)은 약 12° 로 하였다. 高速度카메라는 日立製作所 16-HM으로 本 實驗에서는 약 3,500pictures/s의 速度로 撮影하였으며, 2ms마다 時刻表示用 펄스를 發生시켜 술리렌高速度撮影結果와 스크오프記錄과의 비교를 쉽게 하였고 實驗은 同一條件에서 15회이상 反復 施行하여 그 平均値를 資料로 하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

本 實驗에서는 먼저 混合비가 燃燒에 미치는 影響을 考察하기 위해 오리피스 直徑과 副燃燒室 體積을 變化시키고 点火位置를 副燃燒室의 中央으로 한 條件下에서 混合비를 바꾸며 행하였다. Fig. 3은 燃料-空氣 混合비를 變化시켰을 때의 總燃燒時間의 關係를 나타낸다. 層流 火焰傳播의 경우와 마찬가지로 理論混合比 보다 약간 진한 쪽에서 總燃燒時間이 가장 짧아지고⁹⁾ 亂流火災傳播에 의해 層流火災傳播일 때에 比하여 總燃燒時間이 40~60% 短縮되고 있다.

實驗別로는 $V_0/V_m = 1/5$, 오리피스의 直徑 $d = 10\text{mm}$ 일 때 混合比 4.4에서 總燃燒時間이 19ms로 가장 짧고, 다음은 $V_0/V_m = 1/3$, 오리피스 직

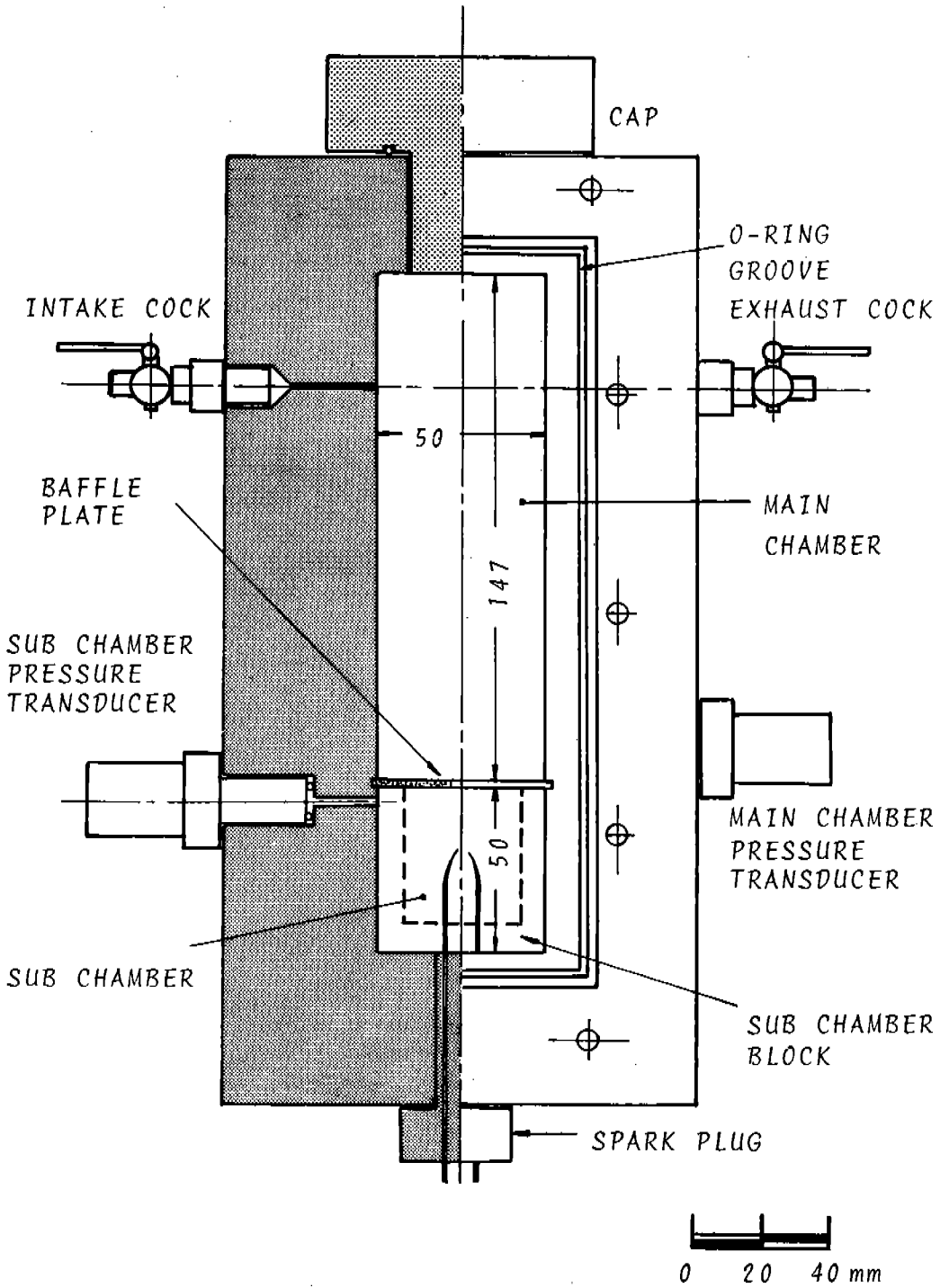


Fig. 1. Combustion Chamber

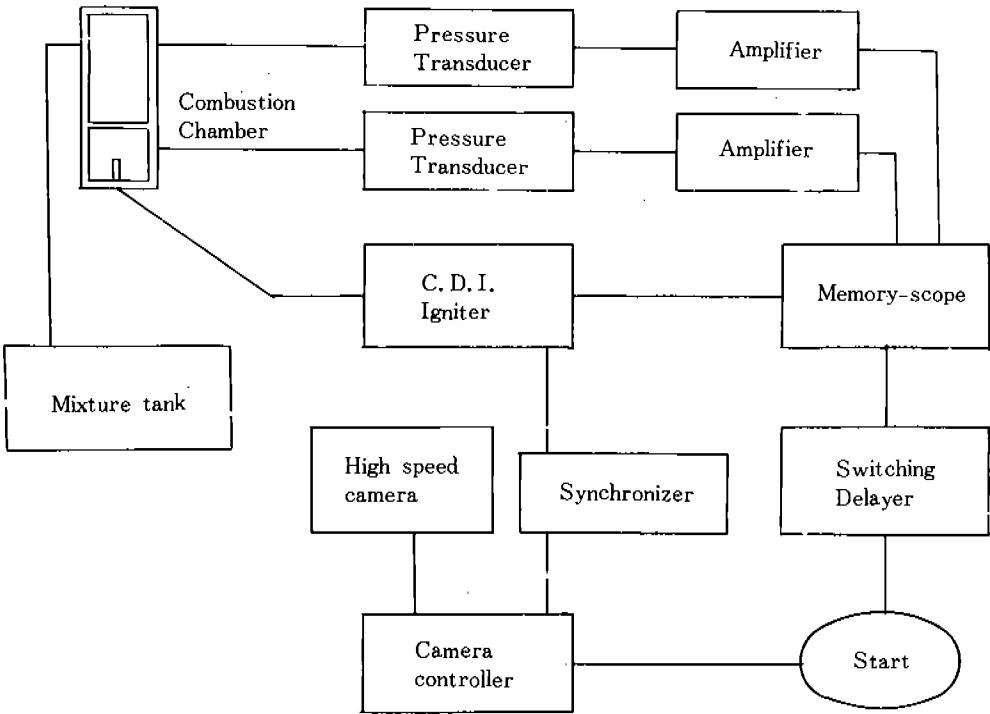


Fig. 2. Schematic Diagram of Measuring System

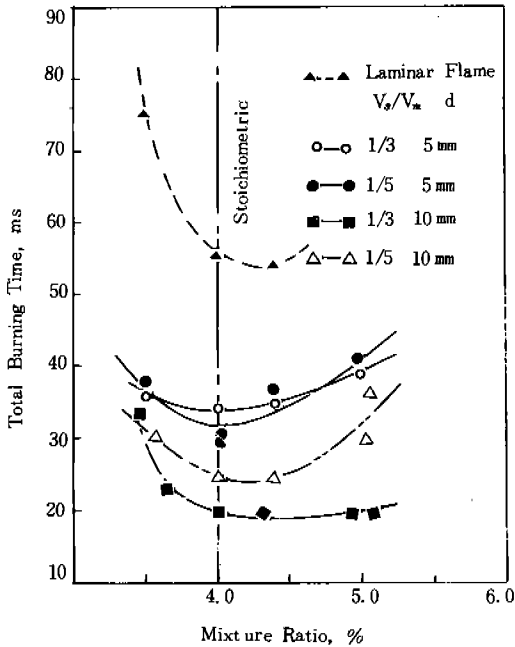


Fig. 3. Total burning time vs. mixture ratio.

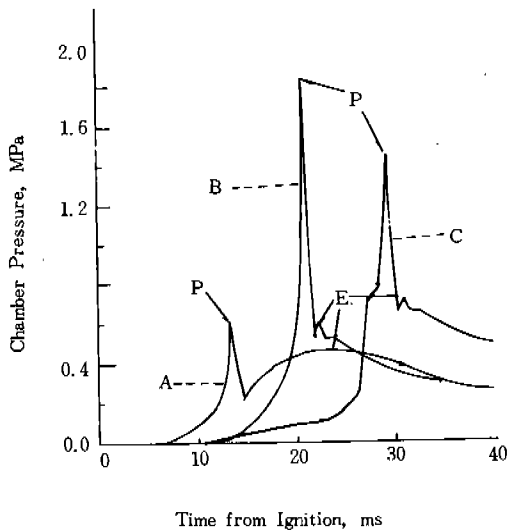


Fig. 4. Diagram of pressure trace.

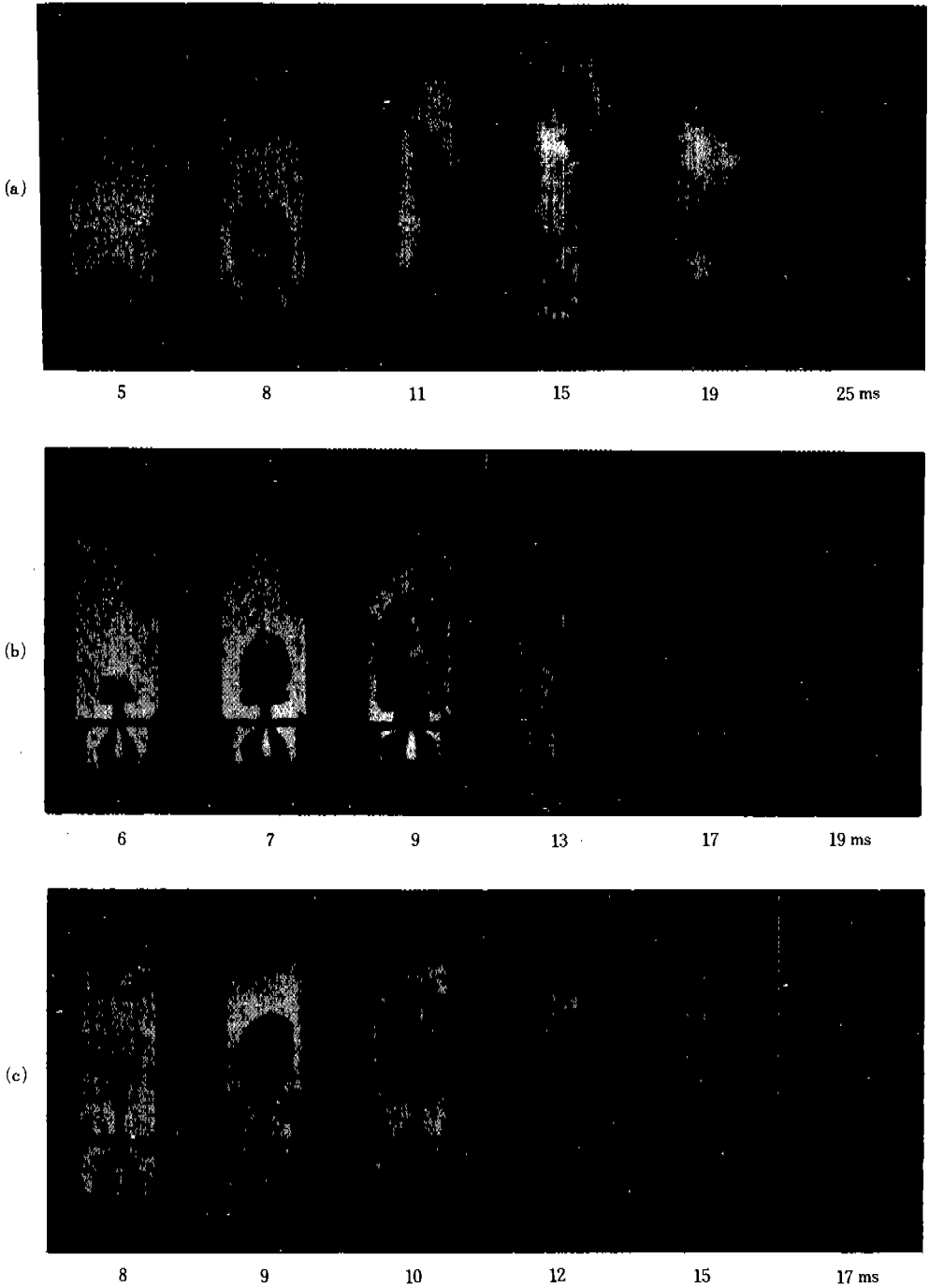


Fig. 5. High speed Schlieren Photograph ($d = 10\text{mm}$)
 V_s/V_m ; (a) 1/10, (b) 1/5, (c) 1/3

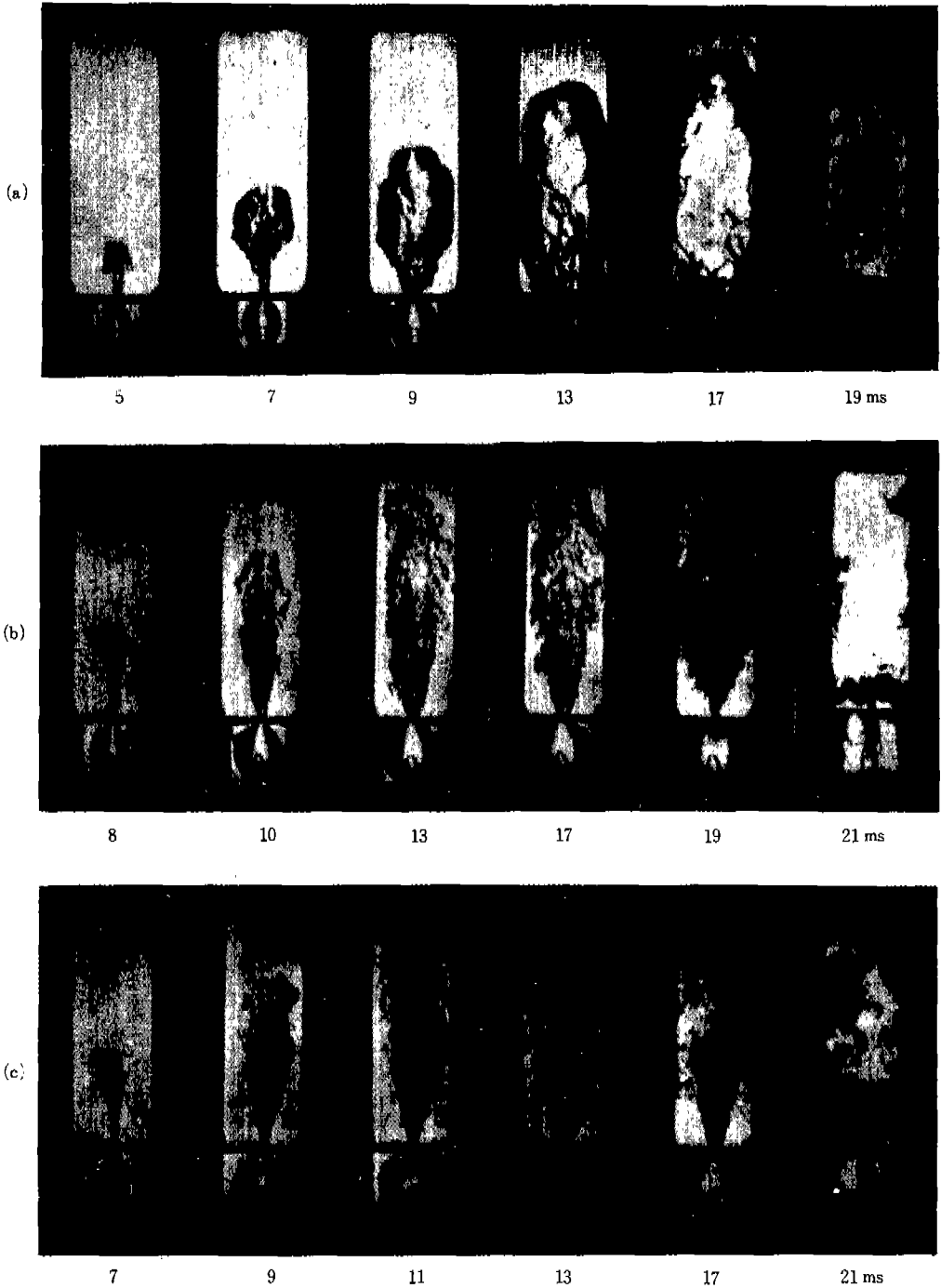


Fig. 6. High speed Schlieren photograph ($d = 7\text{mm}$)
 V_s/V_m ; (a) $1/10$, (b) $1/5$, (c) $1/3$

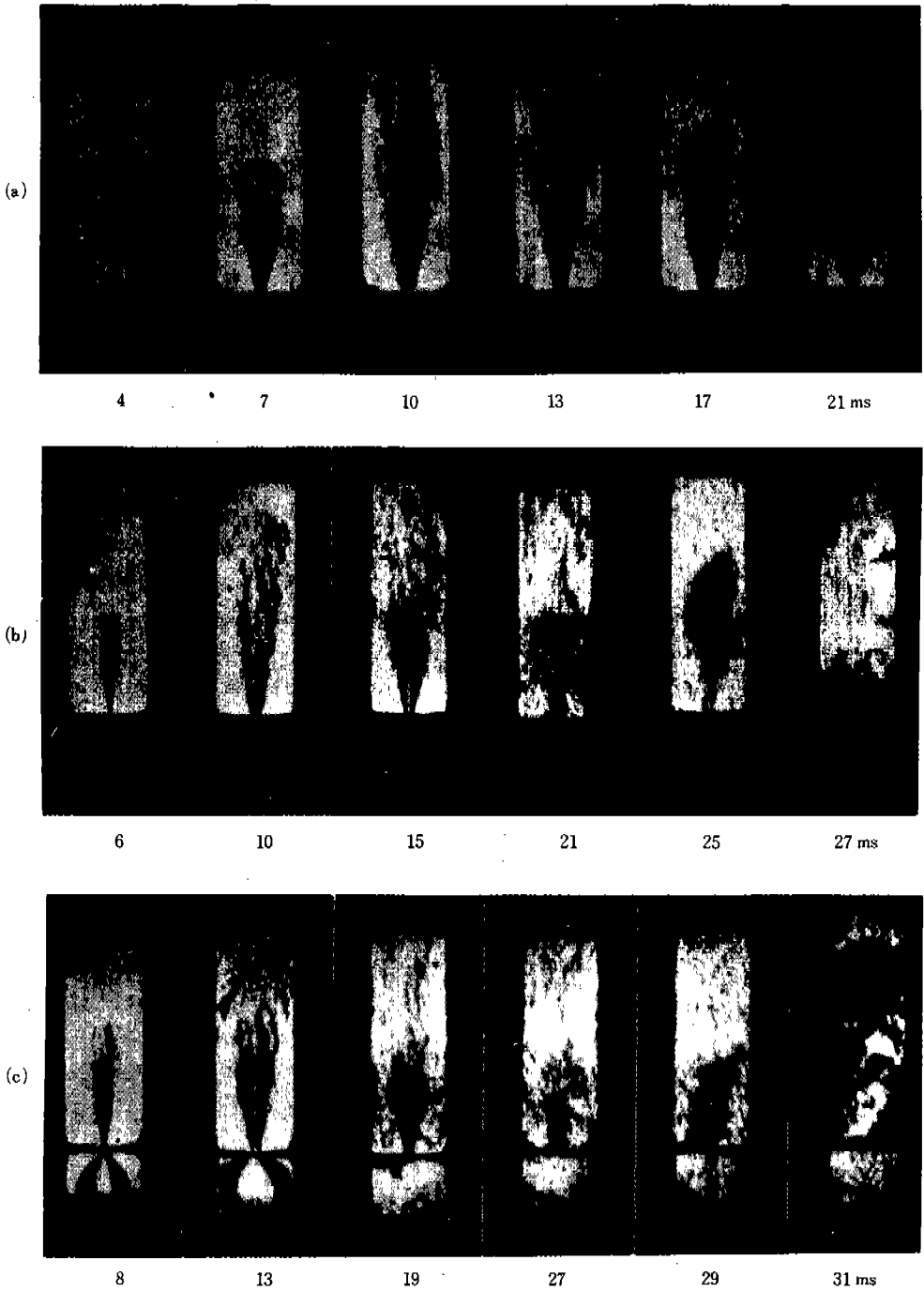


Fig. 7. High speed Schlieren photograph ($d = 5\text{mm}$)

V_s/V_m ; (a) 1/10, (b) 1/5, (c) 1/3

경 $d = 10\text{ mm}$, 혼합비 4.4일 때의 23ms이다.

$V_g/V_m = 1/5$, 오리피스 직경 $d = 5\text{ mm}$ 일 때에는 혼합비 4.0에서 32ms이고, $V_g/V_m = 1/3$, 오리피스 직경 $d = 5\text{ mm}$ 일 때에는 혼합비 4.0에서 35ms이다. 또 $V_g/V_m = 1/3$ 에서는 $V_g/V_m = 1/5$ 에 비하여 혼합비에 대한 總燃焼時間의變化가 敏感하지 않다.

Fig. 4는 副燃焼室의 크기 및 오리피스의 크기를變化시키며 實驗한 結果를 나타낸다.

亂流의 程度에 따라 主燃焼室內의 火災傳播가 3가지 形態로 區分되었으며, Fig. 4의 A, B 및 C 커어브는 이것의 壓力變化를 나타낸다.

이 세가지 形態를 蘇利靚寫眞과 비교하면 A형태는 Fig. 5의 (a)(b)(c)와 Fig. 6의 (a)와 같이 層流火災傳播에 類似하고 B형태는 Fig. 6의 (b)(c)와 Fig. 7의 (a)와 같은 亂流火災傳播이다. C형태일 때는 Fig. 7의 (b)(c)와 같은 亂流火災傳播이나 燃焼遲延時間*이 긴 점이 B형태와 비교하여 다르다.

各條件에서의 火災傳播形態는 Table 1과 같다.

Table 1. 體積比와 오리피스 크기에 따른 燃焼形態

V_g/V_m orifice dia	$1/5$	$1/4$	$1/3$	$1/2$
10 mm	A type	A type	A type	A type
7 mm	B "	B "	B "	A "
5 mm	C "	C "	C "	B "
3 mm	Quenching			

各 燃焼形態의 특징을 고찰하기 위해 $V_g/V_m = 1/5$ 의 예를 들면 다음과 같다.

$d = 10\text{ mm}$ 일 때에는 Fig. 5의 (b)에 해당하며 A 형태이다. 이 때에는 副燃焼室의 크기에 비해 相對적으로 오리피스가 크므로 噴出速度는 빠르지 않으나 噴出 당시의 냉각이 적어 主燃焼室內에서 바로 火災으로 傳播하게 되고 또 곧 亂流스케일이 커져 層流火災傳播에 類似한 形態로 傳播해 간다

$d = 7\text{ mm}$ 에서는 Fig.6의 (b)와 같이 B형태로 나타난다. 이 때는 副燃焼室에 比하여 相對적으로 오리피스가 작으므로 噴出速度는 빨라지나 冷却이 커지고 제트에 의한 亂流가 유도되어 제트 경계부근에서 온도가 낮은 未燃가스와 火災面 사이에 擴散, 稀釋되어 燃焼反應이 일어날 수 없을 정도로 溫度가 낮아져 噴出과 同時에 火災으로 傳播하지 못한다.⁽¹⁰⁾ 그러나 燃焼遲延時間中(약 10ms) 副燃焼室로부터의 噴出에 의해 主燃焼室內에는 未燃가스와 既燃가스의 混合이 일어나고 계속적인 噴出에 의해 에너지를 供給받아 溫度가 上昇되어 再点火된다. 이 때 主燃焼室內에는 未燃가스와 既燃가스가 充分히 混合된 상태이고 溫度가 上昇되어 있는 상태이므로 짧은 시간동안(약 3~4ms)에 매우 급격한 燃焼가 進행된다. 따라서 이 때의 壓力上昇도 매우 급격하다.

$d = 5\text{ mm}$ 에서는 Fig. 7의 (b)와 같이 C형태로 나타난다. 이 때는 B의 경우보다 亂流가 더욱 강하기 때문에 매우 작은 스케일의 亂流가 全燃焼室內에 分散된 후 副燃焼室로부터의 지속적인 噴出에 의한 에너지供給으로 再点火되나 噴出로부터 再点火까지의 時間遲延이 길어(약 20ms) B형태보다 總燃焼時間이 길어지게 된다.

總燃焼時間은 点火로부터 壓力線圖上的 E점에 이르기까지의 時間으로 定하였으며, 이 점은 蘇利靚寫眞과 비교하면 燃焼가 完了된 때와 一致한다. A 형태와 같이 層流火災傳播에 類似한 경우 P점 (Fig. 4 참조)에 해당하는 壓力極大값이 나타날 때 약 80%가량 燃焼가 進行되고 그 이후는 燃焼室 上端壁에 가까와지므로 火災傳播速度가 늦어져 P점에서 E점까지 나머지 20%의 燃焼에 걸리는 時間이 点火로부터 P점에 이르기까지의 時間과 거의 동일하게 된다. 그러므로 点火로부터 P점까지의 時間을 特性燃焼時間으로 생각하여도 좋을 것이다. 그러나 亂流火災傳播의 경우 燃焼遲延後 再点火되어 매우 급격한 燃焼의 進行으로 짧은 時間內에 壓力이 上昇되어 P점에 이르고 곧 燃焼가 종료되므로 A형태의 火災傳播에 비해 P점에는 늦게 도달하나 E점에는 빨리 이르는 경우도 있다. 그러므로 여러 경우를 合理的으로 비교하기 위해 E점을

*여기서 燃焼遲延時間이란 副燃焼室로부터 噴出하여 主燃焼室內에서 火災으로 傳播하기 시작할 때까지 걸리는 시간을 말한다.

總燃焼時間으로 하였다.

Fig. 8은 오리피스 크기의 변화가 總燃焼時間에 미치는 영향을 나타낸다. 가로축을 오리피스 直徑으로 하고 세로축을 總燃焼時間으로 하였다. 副燃焼室 크기가 작을 때에는 $d = 7\text{ mm}$ 부근에서 總燃焼時間이 짧아지고 副燃焼室의 크기가 커지면 오리피스가 그보다 큰 쪽에서 燃焼時間이 짧아지는 경향을 보이는 데 이것은 B형태로 燃焼가 進行될 때에 總燃焼時間이 짧아지는 것을 나타내고 있다.

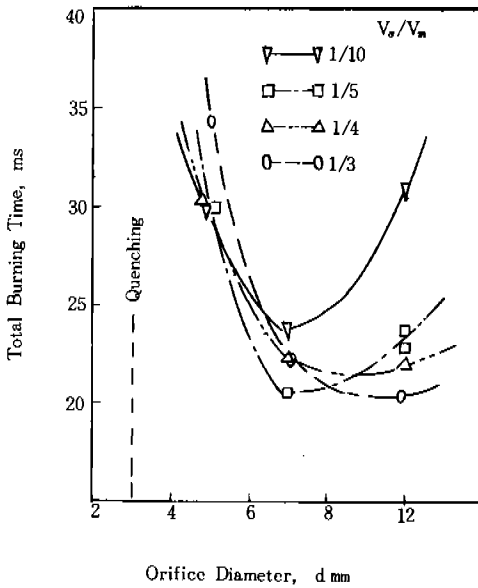


Fig. 8. Effects of orifice diameter on total burning time, mixture ratio = 4.0%

Fig. 9는 副燃焼室의 크기와 總燃焼時間의 관계를 나타내는 것이다. $d = 5\text{ mm}$ 일 때에는 副燃焼室이 작은 쪽에서, $d = 10\text{ mm}$ 일 때에는 副燃焼室이 큰 쪽에서, 또 $d = 7\text{ mm}$ 일 때에는 V_s/V_m 이 $1/3$ 부근에서 總燃焼時間이 짧아지는 것을 나타내고 있다. 이것도 B 형태의 火災傳播가 總燃焼時間 短縮에 유리하다는 것을 나타낸다. 즉 副燃焼室의 크기에 對한 어떤 適合한 크기의 오리피스가 存在한다는 것이다.

Fig. 10은 燃焼進行中 最高壓力을 나타내는 P 點에 해당하는 極大壓力을 나타낸 것이다. Fig. 에서 左側上端쪽에서는 매우 높은 壓力을 나타

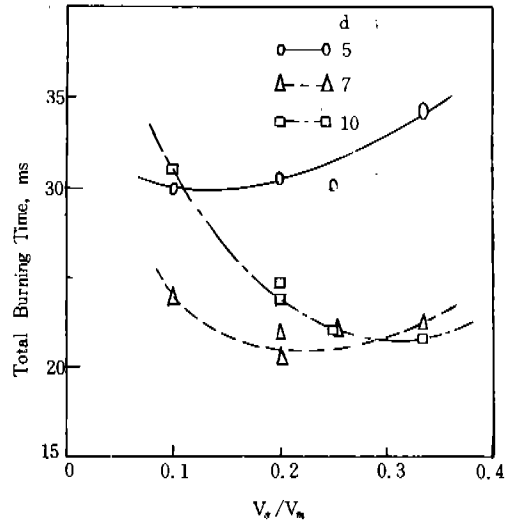


Fig. 9. Effects of sub chamber size on total burning time, mixture ratio = 4.0%

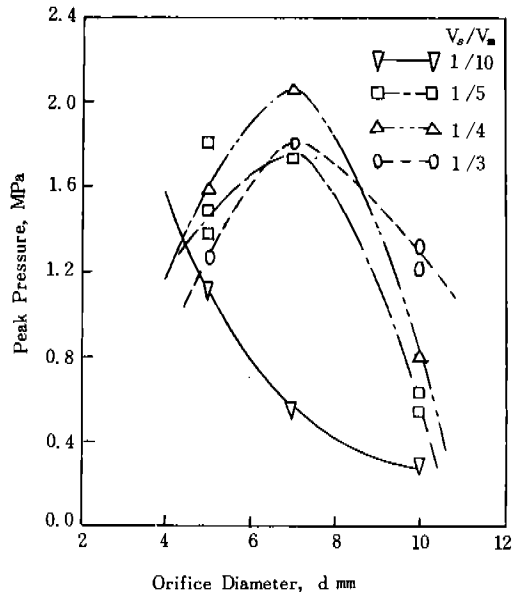


Fig. 10. Effects of orifice diameter on peak pressure, mixture ratio = 4.0%

내는 데 이들은 B, C 形態의 亂流火災傳播를 하는 경우이고, 右側下端쪽의 比較의 낮은 壓力을 나타내는 것은 層流火災에 類似한 傳播의 경우이다. 亂流火災傳播의 경우 燃焼遲延時間 以後

에는 매우 급격한 燃燒反應이 일어나므로 單位時間當 發熱量이 급격히 增大되며 熱損失이 적어져 높은 壓力을 나타낸다.

Fig. 11은 $V_s/V_m = 1/5$, $d = 5\text{ mm}$, 7 mm 으로 하고 點火位置를 變化시켰을 때의 總燃燒 時間을 나타낸 것이다. 가로축은 오리피스로부터 點火位置까지의 거리 (L_x)를 오리피스로부터 副燃燒室 바닥까지의 거리 (L_s)로 나눈 것이다. $d = 5\text{ mm}$ 일 때에는 오리피스 가까운 곳에서 點火하면 B 형태의 연소가 진행되어 總燃燒時間이 짧아지고 먼 곳에서 點火하면 C 형태의 火炎傳播가 일어나 燃燒時間이 길어진다. $d = 7\text{ mm}$ 일 때에는 오리피스에 가까우면 A 형태의 火炎傳播가 일어나며, 副燃燒室 바닥에 가까우면 C형태로 火炎이 傳播되어 燃燒時間이 길어지고, 副燃燒室의 中央에서 點火하면 B형태의 燃燒가 進行되어 總燃燒時間이 짧아진다. 이것으로부터도 總燃燒時間 短縮에 B형태의 亂流火炎傳播가 유리하다는 것을 알 수 있다.

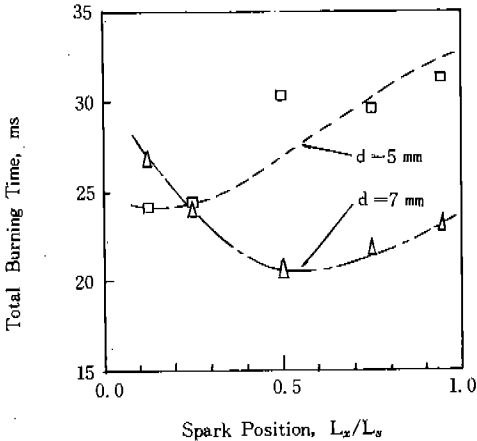


Fig. 11. Total burning time with varying spark Position, $V_s/V_m = 1/5$, mixture ratio = 4.0%

4. 結論

主燃燒室內에 亂流發生을 위한, 副燃燒室이 있는 燃燒室에서 主燃燒室과 副燃燒室을 連結하는 오리피스 크기와 副燃燒室의 크기를 變化시켜 主

燃燒室의 火炎傳播現狀을 調査한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(i) 副燃燒室이 있는 燃燒室로는 副燃燒室이 없을 때에 비해 總燃燒時間을 약 40~60% 短縮시킬 수 있다. 이것은 副燃燒室이 없을 때는 主燃燒室內에서 層流火炎傳播를 하는데 반하여 副燃燒室이 있을 때는 副燃燒室로부터의 噴出에 의한 亂流가 燃燒機構에 영향을 미치기 때문이다.

(ii) 副燃燒室으로부터의 噴出의 流體力學的 性質에 따라 主燃燒室內의 火炎傳播形態는 A層流火炎傳播에 類似한 形態, B亂流火炎形態, C燃燒遲延이 긴 亂流火炎傳播의 세가지 形態로 分類된다.

(iii) 各 副燃燒室의 크기에 對해 總燃燒時間이 最少가 되는 最適 오리피스의 크기가 存在하며 本實驗에서는 副燃燒室의 主燃燒室에 對한 體積比 (V_s/V_m)가 1/4, 1/5, 1/10일 때, 最適 오리피스의 直徑이 약 7 mm이다. 그리고 總燃燒時間이 最少가 될 때의 火炎傳播形態는 모두 B형태이다.

(iv) 同一條件下에서 點火位置의 變化에 따라 總燃燒時間이 變하며 總燃燒時間이 最少가 되는 것은 역시 B형태의 火炎傳播때이다.

(v) 總燃燒時間을 短縮시키기 위해서는 오리피스의 크기와 副燃燒室의 크기 및 點火位置의 適切한 選定이 必要하며, 本實驗에서의 最適條件은 副燃燒室의 主燃燒室에 對한 體積比 (V_s/V_m)가 1/5이고 오리피스 直徑 (d)이 7 mm이며 點火位置는 副燃燒室의 中央일 때이다.

參考文獻

1. 三田 省吾, 小西 正己, 中村 德彦: "TGP付き機關の着火に及ぼす 諸要因," 日本 內燃機關學會 論文集 17卷 8號, pp.55-58, 1978.
2. 吳貞均, 鄭仁碩, 趙慶國: "Lean Mixture에서의 점화조건에 따른 연소특성," 한국 항공우주학회 1981년도 추계 학술 강연회, pp.1-9, 1981.
3. M. W. Evans, M. D. Scheer, L. J. Schoen, and E. L. Miller: "A Study of High Veloc-

- ity Flames Developed by Grids in Tubes," The 3rd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.168-175, 1949.
4. 若井 和憲, 志水 昭史, 織田 幸久: "副室付定容燃焼室内の燃焼に關する研究(第一報, 燃焼過程)," 日本機械學會論文集 B編 47卷 417號, pp.872-879, 1981.
 5. K. Inuma: "A Study of Turbulent Flame Propagation in Closed Vessels," Automobile Exhaust Clarification Study Group, Category III-1, 1977.
 6. 山口 馨起, 大岩 紀生, 浦田 信一, 西江 勇二: "副室式燃焼器内の燃焼機構(噴出ノズル徑の燃焼過程に及ぼす影響)," 日本機械學會論文集 B編 47卷 419號, pp.1390-1399, 1981.
 7. 中原 俊彦, 正岡 島敏, 山口 修次: "定容分割燃焼室における火炎傳ばについて," 日本機械學會論文集 No.788-2, pp.107-109, 1978.
 8. 趙慶國, 鄭仁碩, 鄭仁昇: "成層燃焼에 依한 實驗的 基礎研究," 韓國自動車學會誌 第3卷 第3號, pp.39-48, 1981.
 9. Lewis, B., and Von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd Ed. (1961), 389, Academic Press.
 10. E. S. Starkman, L. P. Haxby and A. G. Cattaneo: "A Study of Free Flames in Turbulent Streams," 4th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.670-673, 1952.