

「이 논문은 1980年度 文教部 學術研究 助成費에 의하여 研究되었음.」

## 成層燃燒에 관한 實驗的 基礎研究

### A Fundamental Investigation on the Stratified Charged Combustion

趙慶國\*·鄭仁碩\*\*·鄭仁昇\*\*  
(K. K. Cho, I. S. Jeung, I. S. Chung)

#### Abstract

The combustion phenomena of the stratified charged model combustion chamber under the initial conditions of the room temperature and the atmospheric pressure were investigated by using pressure record and high speed Schlieren motion picture in comparison with that of the uniformly charged case.

The results show that the total burning time is strongly dependent on the turbulent spouting flame jet speed which promotes the combustion process inside the chamber, and the pressure rise-up of stratified charged combustion is rather faster and higher than that of uniformly charged combustion, which can be resulted in the energy saving.

#### 1. 序 論

內燃機關內的 燃燒過程은 매우 強한 亂流變動 成分에 依하여 火災傳播가 이루어지고 있다. 즉 이와같은 強한 亂流成分의 輸送現象이 일어나고 있는 燃燒室內의 燃燒過程을 完全하게 理解하기 爲하여는 燃燒室의 形狀, 燃燒室壓力, 燃燒室內의 亂流成分強度, 火災傳播速度, 燃燒速度, 燃燒溫度, 混合氣濃度分布 等に 關한 諸 物理的, 化學的 特性을 철저하게 究明하여야 하며, 나아가서 이들 各 因子들의 相互相關關係, 相互依存度에 對하여도 研究해야 할 必要가 있다. 그런데 이들 中에서도 亂流成分強도와 火災傳播와의 相互關係는 가장 重要한 研究對象이다. 約 十餘年 前까지도 各各의 物理的 特性을 調查하는 것에 集中的인 努力을 기울였으나 1970年代부터 亂流成分 輸送現象과 火災傳播過程과의 相互關係를 熱線 流速計, 레이저-도플러 流速計에 依

하여 研究하기 시작하였다.<sup>(1)(2)</sup> 특히 레이저가 商用化됨에 따라 레이저散亂光에 依한 混合氣濃度의 變動成分分布와 亂流成分變化에 對한 研究 結果도 發表되기 시작하였다.<sup>(3)</sup>

그러나 數年前부터 大氣公害防止를 爲하여 自動車機關에서 發生, 排出되는 有害排氣가스에 對한 規制가 엄격해짐에 따라서 內燃機關에 關한 研究動向은 機關의 性能向上 面보다는 公害物質 低減으로 關心이 바뀌게 되었다. 또 몇 回의 油類 波動으로 因하여 全世界的으로 燃費節約, 에너지節減이 重要한 當面課題로 되었다.

이와같은 低公害排出, 低燃費의 當面問題를 解決할 수 있는 可能한 方式으로는 主燃燒室에 稀薄混合氣를 充填시켜 安定된 火災傳播를 維持하는 稀薄混合氣燃燒(Lean-mixture Combustion) 方式을 생각할 수 있다. 그러나 稀薄混合氣를 充填하여 燃燒시킬 경우, 失火(misfire)나 出力低減 等の 우려가 있으나 이를 補完할 수 있는 稀

\* 正會員, 서울大學校 工科大学 航空工學科

\*\* 서울大學校 大學院 航空工學科

薄混合氣 燃燒方式은 直接噴射式成層燃燒方式<sup>(1)</sup> 副燃燒室과 主燃燒室에 混合비가 서로 다른 異種의 混合氣를 充填하는 副燃燒室付 成層燃燒方式<sup>(2)</sup>과 플라즈마 제트 등의 高에너지 點火方式<sup>(3)</sup>을 들 수 있다. 이 중에서 內燃機關에 實用化되고 있는 方式은 副燃燒室付 成層燃燒方式만이다. 그러나 實際 內燃機關의 경우에는 主 燃燒室과 副燃燒室에 供給하는 燃料의 空燃비가 상당히 變動하여 定量的인 解析이 不可能한 경우가 많다. 또한 아직도 이와같은 副燃燒室付 成層燃燒方式에 對한 基礎研究는 그 例를 찾아보기 힘든 實情이다.

本 研究에서는 이와같은 點에 主眼點을 두어 主燃燒室과 副燃燒室 各各의 混合氣를 可能한 限 一定하게 維持하여 成層燃燒의 定性的, 定量的 分析을 試圖하였다. 初期狀態가 室溫, 大氣壓下에서 定積燃燒室을 主燃燒室과 副燃燒室로 分離하여 均一混合氣에 依한 亂流燃燒現象<sup>(7)</sup>과 成層混合氣給氣에 依한 成層燃燒를 調査하고 그 結果를 比較하여 成層燃燒의 特性을 究明하였다.

## 2. 實驗裝置와 그 方法

成層混合氣給氣方式의 成層燃燒의 特性과 그에 對한 現象을 觀察하기 爲하여 그림 1에 表示한 內徑 150mm, 길이 35mm의 鋼鐵製 圓筒形 燃燒室을 製作하였다. 燃燒室은 半圓形 鋼鐵板으로 上部의 主燃燒室과 鋼鐵板下部의 副燃燒室로 分離되어 있으며 主燃燒室과 副燃燒室의 體積比는 約 10.8 : 1이다. 그리고 4mm의 오리피스형 분출구가 있다. 噴出口는 均一混合氣를 給氣하여 燃燒할 경우에는 噴出口를 開放하고 均一混合氣를 主燃燒室과 副燃燒室에 同時에 充填하며, 成層混合氣를 給氣할 경우에는 燃燒室上端의 開閉棒으로 噴出口를 閉鎖하고 主燃燒室에는 稀薄混合氣를 充填하고 副燃燒室에는 理論混合비에 가까운 過濃混合氣(프로판體積百分率混合比 4.2%, 이것은 混合比 4.2%의 경우가 가장 압력이 높고 全 燃燒時間이 가장 짧았기 때문이다.)를 充填한 後, 點火直前に 開閉棒을 뽑고 副燃燒室의 直徑 1mm 針端形 피아노線 點火栓으로 點火시

킨다. 點火電極間의 間隙은 2mm이며 點火코일은 市販의 自動車用 點火코일을 使用하였고 點火方式은 容量放電型 點火裝置(Capacitor Discharging Igniter, 略하여 CDI)를 利用하였다. 그리고 燃燒室의 下端兩側에는 吸氣用, 排氣用 코크와 스트레인게이지方式의 壓力變換器가 設置되어 있다. 壓力變換器의 出力은 增幅器를 通하여 전자오실로그래프(高速度 슬리렌寫眞撮影時에는 오실로 스코오프)에 記錄한다. 燃燒室의 前後面에는 寫眞撮影이 可能한 두께 20mm의 유리창을 設置하고 燃燒室面과 유리창 사이에는 耐熱 고무가스켓트를 넣어 燃燒室의 氣密을 維持시켰다.

그림 2는 願하는 混合氣를 製作하기 爲한 予混合氣 製作裝置이다. 通常의 均一予混合氣製作裝置<sup>(8)</sup>는 取扱 및 二種의 서로 다른 成層混合氣製作에 不便하므로 專用的 主燃燒室用, 副燃燒室用의 成層混合氣를 同時에 製作할 수 있는 流路로 改良하였다. 副燃燒室用 混合氣流路를 閉鎖하면 均一混合氣 製作裝置로서도 使用할 수 있다. 使用한 燃料은 市販의 프로판가스이며 混合比는 프로판體積混合比로 表示한다.

그림 3은 全体 實驗概念圖이다. 燃燒室을 眞空펌프로 眞空狀態로 만든 後, 主燃燒室과 副燃燒室을 차단시킨 다음 各 燃燒室에 均一混合氣, 或은 서로 다른 2種類의 成層混合氣를 대기압보다 조금 높게 充填한다. 그리고 排氣코크를 잠깐 열었다 닫아 燃燒室內의 初期壓力을 大氣壓狀態로 維持시키고 開閉棒을 뽑고 遠隔스위치를 動作시키면 高速度攝影機가 撮影을 시작하고 同期回路에 依하여 CDI 點火裝置로 副燃燒室內의 混合氣를 點火한다. 遠隔스위치의 動作에 依하여 전자오실로그래프(或은 오실로스코오프)가 作動하여 燃燒室內의 燃燒壓力이 記錄된다. 오실로스코오프의 外部同期信號는 點火信號를 擇하였다.

슬리렌寫眞光學配置는 平面 Z型式을 使用하였으며<sup>(9)</sup>, 高速度攝影機는 日立製作所 16-HM으로 最大 10,000pictures/sec 撮影이 可能하다. 本實驗에서는 約 3,000pictures/sec의 撮影速度로 kodak 7231(ASA 80) 필름을 使用하여 슬리렌高速

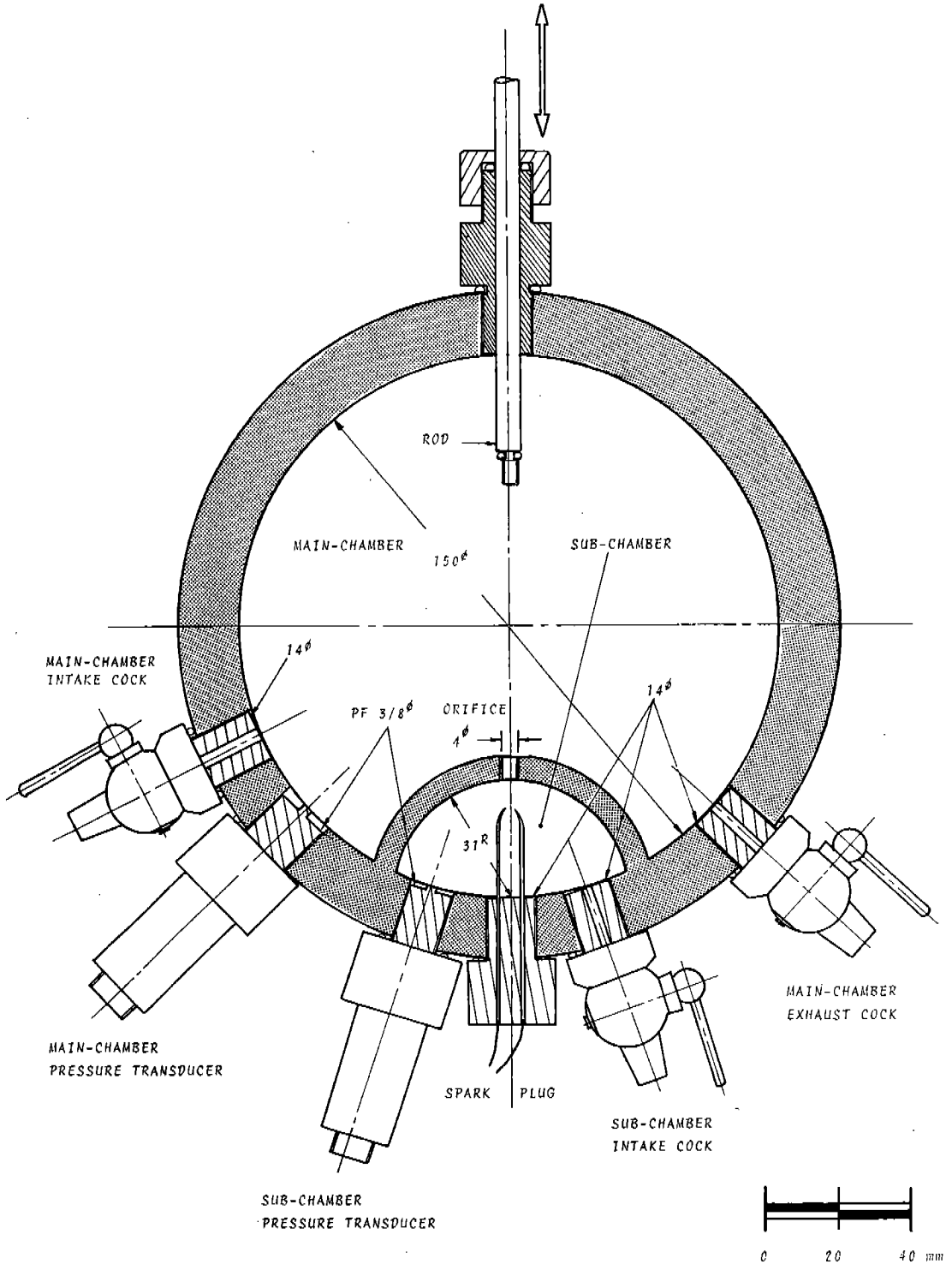


그림 1 燃燒室 細部圖

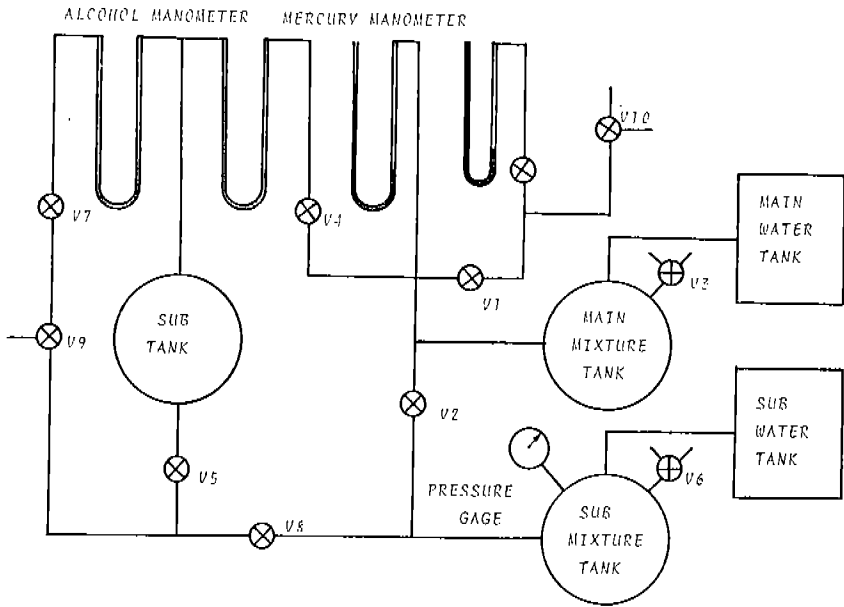


그림 2 豫混合氣製作裝置

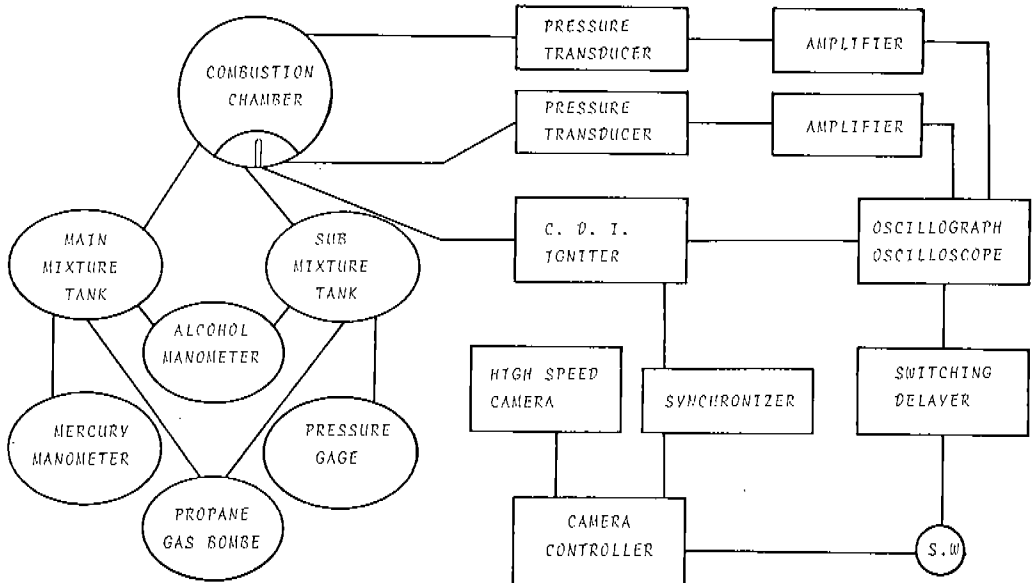


그림 3 全体實驗概念圖

度高眞撮影을 行하였다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

主燃燒室과 副燃燒室에 同一한 混合氣를 充填하여 燃燒한 均一混合氣燃燒와 主燃燒室에는 燃費經濟性を 考慮하여 稀薄混合氣를 充填하고, 副燃燒室에는 理論混合比에 가까운 過濃 混合氣를 充填하여 燃燒한 成層混合氣燃燒에 對한 實驗結果의 一例를 그림 4 ~ 그림 7에 나타낸다. 그림 4는 主燃燒室과 副燃燒室에 各各 混合比 4.2%의 均一混合氣를 充填하여 燃燒한 경우의 高速度 슬리렌寫眞과 主燃燒室, 副燃燒室의 壓力線圖를 表示한다. 壓力線圖의 가로軸은 點火로부터의 各時刻를 表示하며 세로軸은 各 燃燒室의 燃燒壓力를 絕對壓力(單位는 MPa)으로 나타낸다. 그림 5는 主燃燒室에는 3.54%, 副燃燒室에는 4.2%(이것은 平均混合比 3.6%에 해당함)의 成層混合氣를 充填하여 燃燒한 경우의 高速度 슬리렌寫眞과 各 燃燒室의 壓力線圖를 表示한다. 단, 成層混合氣의 경우에 平均混合比는 主燃燒室과 副燃燒室에 充填된 各各의 混合氣를 燃燒室 全体體積으로 平均한 값을 나타낸다. 즉 이것은 成層混合氣燃燒의 경우 平均混合比와 均一混合氣 燃燒의 경우 混合比가 同一하면 燃燒室 全体에 充填된 燃料量이 同一함을 意味한다.

그림 6은 主燃燒室에는 2.5%, 副燃燒室에는 4.2%(이것은 平均混合比 2.64%에 해당함)의 成層混合氣를 充填하여 燃燒한 경우의 高速度 슬리렌寫眞과 主燃燒室, 副燃燒室의 壓力線圖를 나타낸다. 그림 7은 主燃燒室과 副燃燒室에 各各 混合比 3.6%의 均一混合氣를 充填하여 燃燒한 경우의 高速度 슬리렌寫眞과 主燃燒室, 副燃燒室의 壓力線圖를 나타낸다. 여기서 그림 5의 成層混合氣燃燒의 경우(主燃燒室 3.54%, 副燃燒室 4.2%, 그리고 平均混合比 3.6%에 해당함)와 그림 7의 均一混合氣燃燒의 경우(混合比 3.6%)는 同一한 燃料量이 充填되어 있다.

各 燃燒室內의 燃燒過程에 對한 全燃燒時間의 決定은 高速度 슬리렌寫眞과 各 燃燒室의 壓力線圖를 每時刻別로 比較檢討한 結果 高速度 슬리

렌寫眞에서 主燃燒室에 燃燒가 完了되었을 때와 主燃燒室의 壓力線圖에서 壓力이 最大値를 表示할 때의 時刻이 一致함이 確認되었기 때문에 主燃燒室의 全燃燒時間은 點火後 主燃燒室 最大壓力 指示時刻까지의 時間間隔으로 取하기로 하였다. 高速度 슬리렌 寫眞은 全實驗의 모든 경우마다 撮影하지는 않고 重要한 部分만 撮影하여 火炎傳播의 樣相을 觀察하고 이 結果와 壓力線圖의 解析結果와 比較하였으며 高速度 슬리렌寫眞은 壓力線圖의 結果에 參考하였다.

그리고 高速度 슬리렌寫眞에서 副燃燒室의 燃燒가 完了되었을 때에는 副燃燒室의 壓力線圖에 最初의 피이크가 나타난 時刻과 一致하였으므로 點火後 이때까지의 時間을 副燃燒室의 全燃燒時間으로 取하였다.

各 경우의 高速度 슬리렌寫眞에서 알 수 있는 것처럼 平均混合比는 稀薄한 그림 5(平均混合比 3.6%)의 경우와 그림 6(平均混合比 2.64%)의 경우에도 充填된 燃料의 全燃燒時間은 全燃燒時間이 가장 짧은 그림 4(均一混合氣 4.2%)의 경우와 거의 同一하다. 즉 均一混合氣 4.2%의 경우에는 全燃燒時間이 約 35msec이고, 平均混合比 3.6%인 成層混合氣의 경우는 約 37msec, 平均混合比 2.64%인 成層混合氣의 경우는 約 40msec 정도로서 全燃燒時間은 主燃燒室內에 充填된 混合氣의 混合比와는 거의 無關하고 오히려 副燃燒室內에 充填된 混合氣의 混合比와 直接的인 關係가 있음을 알 수 있다. 이것은 副燃燒室에 充填된 混合氣는 均一混合氣를 充填한 경우와 成層混合氣를 充填한 경우(混合比 4.2%)가 같기 때문에 副燃燒室으로부터 主燃燒室로 噴出되는 亂流火炎噴出速度가 同一하여 主燃燒室에서의 燃燒을 促進시키기 때문인 것으로 思料된다. 特히 主燃燒室의 混合比 2.5%인 成層混合氣燃燒의 경우(그림 6)에는 噴出火炎이 主燃燒室 上端에 충돌하여 燃燒室 左右에 큰 渦流를 形成하여 亂流火炎의 發達이 上昇의으로 促進됨을 알 수 있다. 反面에 混合比 4.2%인 均一混合氣燃燒의 경우에는 噴出火炎의 直角方向으로 層流火炎에 類似한 火炎傳播가 亂流噴出火炎傳播와 同時에 이루어

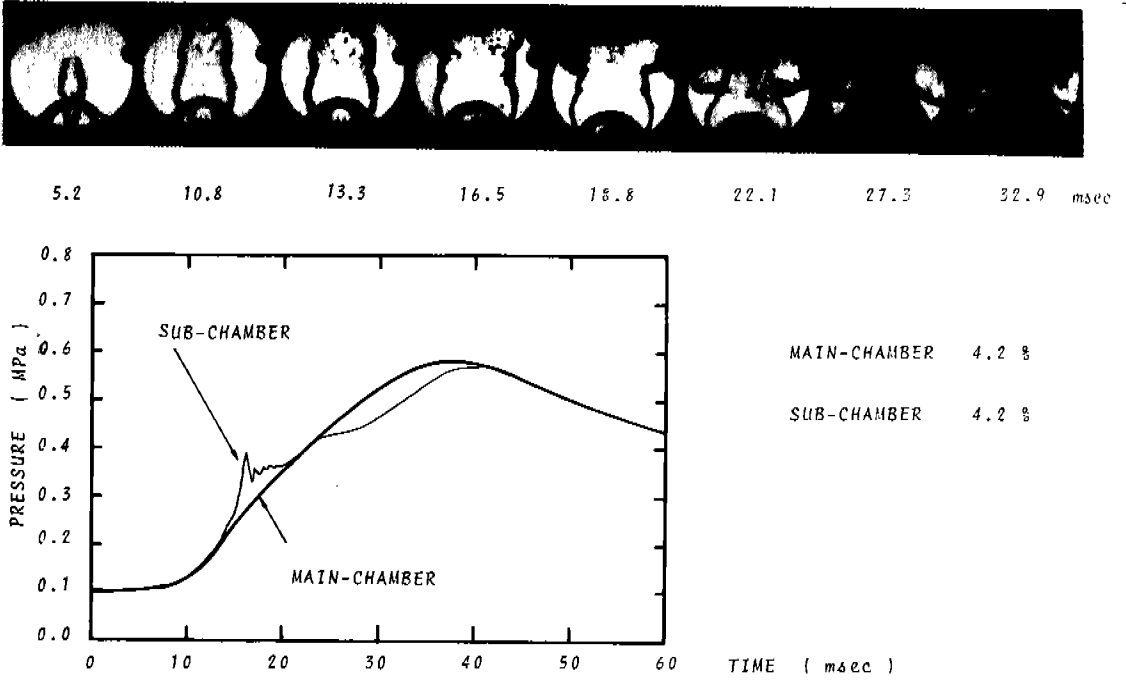


그림 4 均一混合氣의 경우 (混合比 4.2%)

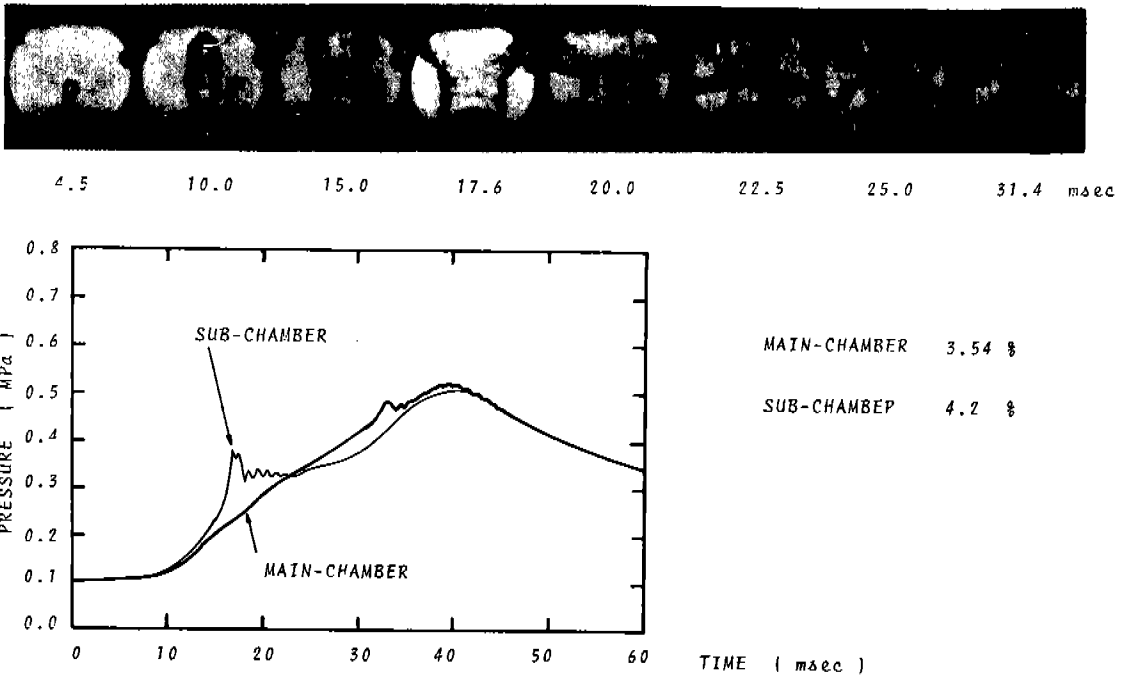


그림 5 成層混合氣의 경우 (混合比 3.54%+4.2%)

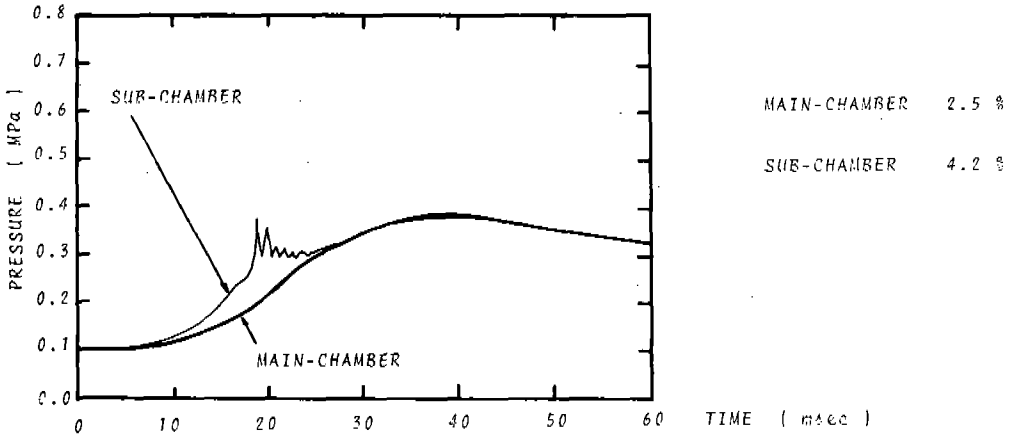
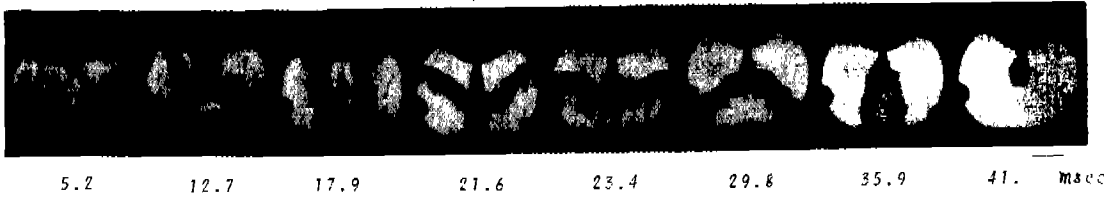


그림 6 成層混合氣의 경우 (混合比 2.5%+4.2%)

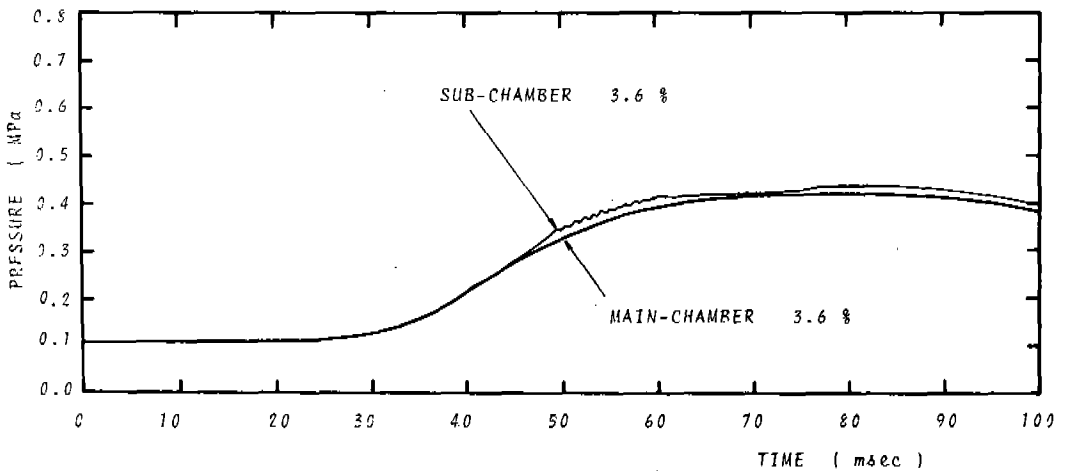


그림 7 均一混合氣의 경우 (混合比 3.6%)

어저서 成層燃焼의 경우보다는 3~4 msec 가량 全燃焼時間이 짧다.

그러나 이때의 層流火炎傳播는 燃焼室 全体の 火炎傳播過程에 비하면 거의 無視할 수 있을 정도이고 主燃焼室內的 燃焼過程은 대부분 副燃焼室로부터 噴出되는 亂流噴出火炎에 의하여 決定된다는 것을 意味한다고 볼 수 있다. 特히 이事實은 그림 6 과 그림 7 을 比較할때 平均混合比 2.64%인 成層混合氣燃焼의 경우가 混合比 3.6%인 均一混合氣燃焼의 경우보다도 全燃焼時間이 훨씬 短縮되는 것으로도 充分히 알 수 있다. 즉 成層燃焼의 경우에는 主燃焼室에는 混合比 2.5%인 稀薄混合氣가 充填되어 있으나 副燃焼室에는 混合比 4.2%인 過濃混合氣가 充填되어 있어 3.6%의 均一混合氣 燃焼時 보다도 成層燃焼의 경우가 副燃焼室로 부터 噴出되는 亂流噴出火炎 速度가 빠르기 때문에 主燃焼室內的 混合氣에 큰 亂流輸送現象이 일어나서 全体的으로 稀薄混合氣成層燃焼의 경우가 더 빨리 燃焼된다고 생각 된다.

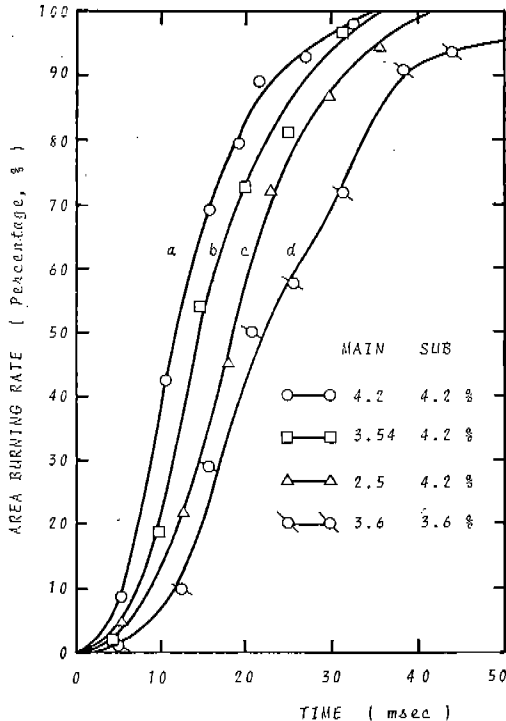


그림 8 火焰面積分割比

그림 8 에는 이상의 각 경우에 點火後 時間이 경과함에 따라 進行되는 火炎面積分割比를 百分率로 表示한다. 火炎面積分割比는 各時刻에 傳播한 火炎의 投影面積을 나타낸다. 그림 8 을 보면 均一混合氣 4.2% (그림의 a) 와 2 가지 成層混合氣의 경우 (그림의 b, c) 에는 約 35~40 msec 以內에 燃焼가 完了되지만 均一混合氣 3.6%의 경우 (그림 d) 에는 後期 約 10%의 未燃混合氣의 燃焼에 全燃焼時間의 半以上을 消費한다. 즉 副燃焼室에서 主燃焼室로 噴出되는 亂流火炎 噴出 速度가 다른 混合氣 4.2% (그림의 a, b, c) 의 경우보다 느려 燃焼 後期에는 亂流強度가 점점 減小되어 層流燃焼에 가까운 火炎傳播가 支配의이기 때문이라고 思料된다.

그림 9 에는 均一混合氣燃焼, 成層混合氣 燃焼에 對하여 各 混合比에 따라 主燃焼室의 全燃焼時間을 表示한다. 主燃焼室의 全燃焼時間은 理論混合比보다 조금 過濃인 混合比 4.2%에서 最小值를 나타내었다. 成層燃焼의 경우에는 均一混合氣에서 燃焼가 되지 않는 極히 稀薄混合比

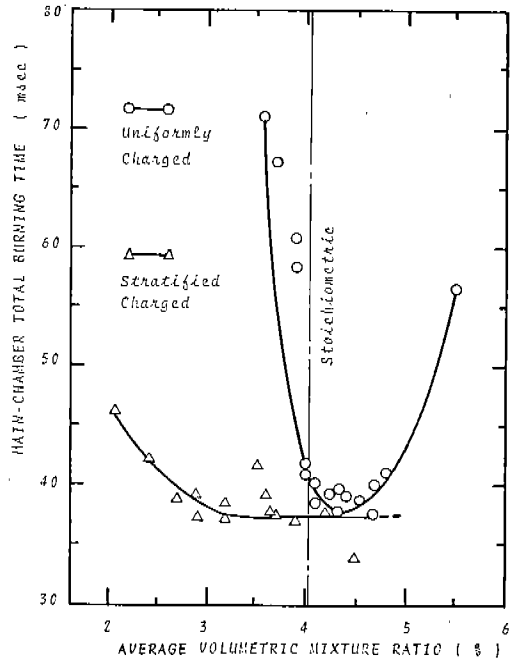


그림 9 主燃焼室 全燃焼時間



領域에서도 燃焼가 이루어지고 있으며 全燃焼時間도 매우 短縮됨을 알 수 있다. 즉 混合比 3.6%인 均一混合氣 燃焼에서는 全燃焼時間이 約 72 msec 정도이나 成層混合氣燃焼의 경우는 約 38 msec 정도로서 거의 半정도로 燃焼時間을 短縮할 수 있다. 特히 成層混合氣의 경우 平均混合比 3% 以上에서는, 均一混合氣燃焼의 경우 最小全燃焼時間이 나타난 混合比 4.2%의 全燃焼時間과 거의 一致하고 있다.

그림 10에는 均一混合氣燃焼, 成層混合氣 燃焼에 對하여 各 混合比에 따라 副燃焼室의 全燃焼時間을 表示한다. 副燃焼室의 全燃焼時間도 거의 主燃焼室의 경향과 같음을 나타내고 있다.

그림 11에는 均一混合氣燃焼, 成層混合氣 燃焼에 對하여 各 混合比에 따라 燃焼室 最高壓力을 表示한다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 理論混合比보다 約 5% 정도 過濃인 混合比 4.2% 부근에서 燃焼室 最高壓力 約 0.6MPa으로 最大値를 나타내었으며 이것은 通常의 炭化水素系 燃料의 一般의인 燃焼特性과 一致하는 結果이다. 그리고 燃焼室 最高壓力은 混合比 3.6%의 경우, 均一混合氣燃焼와 成層混合氣燃焼의 結果를 比較하면 均一混合氣燃焼를 基準으로 할 때 約 20% 정도 成層混合氣燃焼의 경우가 上昇함을 알 수 있

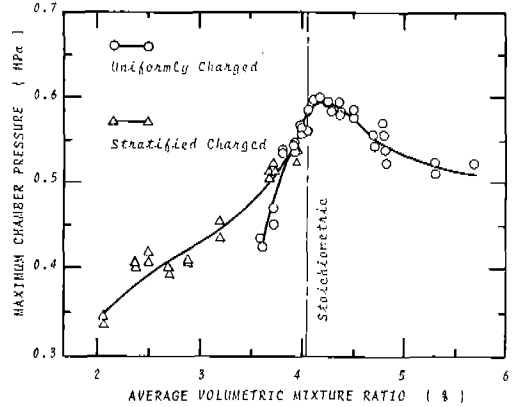


그림 11 燃焼室 最高壓力

다. 이와같이 同一한 燃料量을 充填하더라도 成層燃焼의 경우가 燃焼壓力이 더욱 上昇하는 것은 燃焼時間이 短縮됨에 따라 單位時間當 有效 發熱量이 增加하기 때문이라고 생각된다.

以上の 結果를 綜合하여 보면 主燃焼室內의 燃焼過程은 混合比와는 거의 無關하고 主로 亂流 火炎噴出速度에 依해서 支配되며 成層 燃焼方式을 利用함으로써 燃焼壓力도 上昇시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

初期狀態가 室温, 大氣壓下에서 副燃焼室付 定積燃焼室內을 傳播하는 均一混合氣亂流燃焼와 主燃焼室에는 稀薄混合氣, 副燃焼室에는 過濃混合氣(混合比 4.2%)를 充填한 成層混合氣亂流燃焼의 特性을 調査한 結果, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) 主燃焼室에 極히 稀薄한 混合氣를 充填한 成層混合氣의 全燃焼時間은 均一混合氣의 理論 混合比부근(混合比 4.2%)의 경우, 즉 最小全燃焼時間이 나타나는 경우와 거의 同一하다.

(2) 이것은 副燃焼室의 過濃混合氣에 依하여 噴出된 強한 계트火炎이 主燃焼室內에 強한 亂流를 誘發시켜 主燃焼室內의 燃焼를 促進시키기 때문이다.

(3) 同一한 燃料量을 充填하더라도 成層混合氣

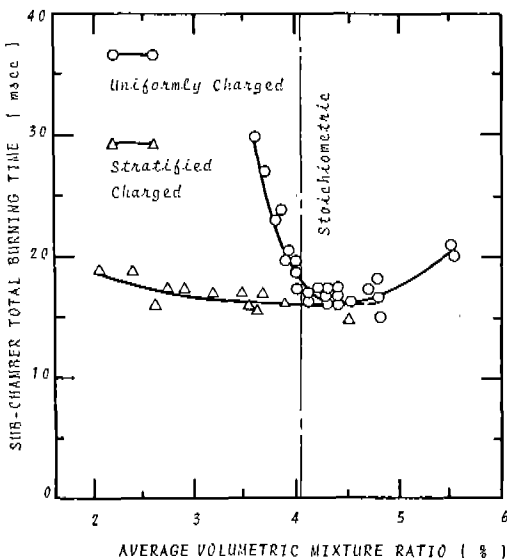


그림 10 副燃焼室 全燃焼時間

燃燒(단, 副燃燒室에는 混合比 4.2%의 混合氣를 充填함)의 경우가 均一混合氣燃燒에 比하여 壓力上昇이 迅速하며, 따라서 未燃混合氣 및 燃燒室 壁으로의 熱傳導에 依한 熱損失이 적기 때문에 더 높은 燃燒室最高壓力이 나타난다.

(4) 그러므로 成層混合氣燃燒에 依하여 燃燒效率의 極大化를 圖謀할 수 있고, 實質적으로 燃費節減의 效果를 거둘 수 있다.

또한 稀薄混合氣燃燒에 依하여 公害 有害排氣 가스成分의 低減이 期待되므로 以後 燃燒排氣 가스分析에 關한 研究가 계속되어야 할 것으로 思料된다.

#### 參 考 文 獻

1. E. G. Groff and F. A. Matekunas; "The Nature of Turbulent Flame Propagation in a Homogeneous Spark-Ignited Engine," SAE Technical Paper 800133, 1980.
2. D. R. Lancaster; "Effects of Engine Variables on Turbulence in a Spark-Ignition Engine," SAE Technical Paper 760159, 1976.
3. S. C. Johnston, C. W. Robinson, W. S. Rorke, J. R. Smith, and P. O. Witze; "Application of Laser Diagnostics to an Injected Engine." SAE Technical Paper 790092, 1979.
4. K. Inuma; "A Study of Turbulent Flame Propagation in Closed Vessels," Automobile Exhaust Clarification Study Group, Category III-1, 1977.
5. 若井和憲, 志水昭史, 織田幸久; "副室付定容燃燒室內의 燃燒에 關する 研究(第1報, 燃燒過程)," 日本機械學會論文集 B編 47卷 417號, pp. 872~879, 1981.
6. B. Cétégen, K. Y. Teichman, F. J. Weinberg, and A. K. Oppenheim; "Performance of a Plasma Jet Igniter," SAE Technical Paper 800042, 1980.
7. 山口馨起, 大岩紀生, 浦田信一, 西江勇二; "副室式燃燒器內의 燃燒機構(噴流ノズル徑의 燃燒過程に及ぼす影響)," 日本機械學會論文集 B編 47卷 419號, pp. 1390~1399, 1981.
8. 趙慶國, 鄭仁碩, 許元旭; "火焰傳播速度測定에 關한 研究 - 層流火焰에 關하여," 自動車技術學會 第1卷 第1號, pp. 28~41, 1979.