

《論 文》

火焰傳播速度測定에 관한 研究

—層流火焰에 關하여—

趙慶國*·鄭仁碩**·許元旭**

A Study on the Flame Propagating Speed Measurement

—For the Laminar Flame—

Kyung-Kook Cho, In-Seuck Jeung, Won-Wooc Hur

Abstract

Propane-Air premixed combustible gas was ignited by the conventional current break system inside the open combustion chamber under the atmospheric pressure and the room temperature to measure the flame propagating speed and the burning speed, also to elucidate the history of the propagating flame behavior and wall effects to flame shape by using Ion Gap Method and High Speed Schlieren Photography.

The results obtained show that the maximum flame propagating speed and maximum burning speed are approximately 292 cm/sec and 36 cm/sec at the mixture ratio 4.6%, respectively. The cellular flame structures can be observable in the rich mixture region, moreover, the cellular structures become finer, with increasing the mixture strength.

I. 序 論

內燃機關에 있어서 機關의 性能을 調查하기 爲하여 機關內를 傳播하는 火焰의 傳播速度, Gas 流動速度, 火焰傳播經過形態 및 火焰溫度 等に 關한 情報가 要求되고 있다. 그러나 이 中에서도 火焰傳播速度測定이 困難한 것은 溫度, 壓力, 流體의 速度 및 方向이 時時刻刻으로 變化하는 非定常流이며 또한 過渡의 인 경우가 많기 때문이다.

本研究은 이 因子들 中에서 火焰傳播速度 및 火焰傳播經過를 면밀히 밝혀내고 그 本質的인 現象의 究明과 아울러 資料를 取함을 目的으로 한다.

또한 燃燒過程은 定壓燃燒方式과 定積燃燒方式

의 두가지 形態로 크게 大別될 수 있으며 定積燃燒方式은 燃燒過程이 進行됨에 따라서 燃燒室內의 壓力이 急激히 上昇되고 斷熱壓縮에 依한 溫度上昇이 誘發된다. 따라서 定積燃燒方式은 火焰傳播速度와 燃燒速度에 壓力上昇의 影響이 包含되므로 本研究에서는 壓力上昇의 影響을 排除할 수 있는 定壓燃燒方式을 擇하였다.

종래에까지 火焰速度를 測定하는 方法으로는, Hot Wire法, Ion Gap法, 高速度攝影 等を 使用하는 것들이 있었으나 이들의 大部分은 測定素子を 被測定流體內에 挿入하여야 하므로 흐름의 性質을 變化시킬 可能性이 크고 測定值의 信賴度가 低下된다. 또한 被測定流體內에 測定素子を 裝置하기 困難할 경우도 있다.

* 正會員, 서울大學校 工科大學

** 서울大學校 工科大學

Laser Doppler Velocimeter는 1964年度에 최초로發表된以來實用化開發에集中的인 努力을投入하여現在에는流速測定에 많이活用되고 있다. 그러나 Laser Doppler Velocimeter를利用하여化學反應이隨伴되는燃燒現象에서火焰傳播速度를測定한例는 거의 없다.

本研究에서는 Ion Gap法和高速度 Schlieren撮影에依하여火焰傳播速度의測定, 燄火焰構造의觀察, 燃燒速度의算出을遂行하였으며다음機會에 Laser Doppler Velocimeter에依한測定結果와이들에對한檢討를提示할豫定이다.

II. 實驗裝置 및 그·方法

初期狀態가大氣壓 및 室溫인狀態下의開放燃燒室內에서 Propane-空氣 可燃性混合氣中을傳播하는火焰의傳播速度를測定하고火焰傳播經過를 면밀히 調査하기爲하여 그림. 1에表示된

은圓柱形燃燒室에比하여燃燒室의氣密維持에特殊한技術을要하고燃燒室의製作工程도複雜하지만本研究에서는燃燒室內을傳播하는火焰傳播過程을詳細히高速度술리렌撮影(High Speed Schlieren Photography)하여燃燒室전반에걸친火焰面의流動形態 및燃燒室壁에依한火焰面傳播의影響等を檢討하기爲하여製作工程은簡單하나測定視野가極히一部分에局限된圓柱形燃燒室을피하고測定視野가넓은四角柱形燃燒室을採擇하였다.

燃燒室의前後面에는 Schlieren撮影을爲하여두께 10mm의光學 Coating된유리板을設置하였다. 그리고燃燒室上端의양측면에는吸氣用과排氣用 Cock가各各裝着되어있고燃燒室의正中央線 양측에는 Ion Gap法으로火焰의傳播速度를測定하기爲하여 Ion Probe를插入하였다. Ion Probe에對한 자세한說明은다음章에서言及한다.

그리고 Ion Probe에서 50mm上部에는燃燒室內의平均壓力를測定하기爲하여 Strain-gage式 Pressure Transducer를裝着하였다. Pressure Transducer의測定範圍는 0~2 kg/cm²이며,動特性은約 650Hz까지追從한다. Transducer의出力은 Strain Amplifier로増幅되어 Tektronix製 5113 Storage Oscilloscope를通하여觀察하였다. 사용한 Pressure Transducer는空氣式壓力基準機에依하여較正하였으며 2 kg/cm²全領域에서直線的인結果를얻을수있었다.

燃燒室의下端 양측에는市販自動車點火栓을改造하여直徑 1mm의 piano線을附着하고電極의 끝부분은針端形으로加工하였다. 電極間의間隙은 3mm로固定시켰다.

本研究에서는燃燒室의壓力增加가火焰傳播速度에 미치는影響을除去하기爲하여燃燒室의上端과下端은開放 가능한直徑 85mm의 두경을設置하였다. 즉, 먼저燃燒室內의可燃性混合氣를大氣壓狀態로充塡하고燃燒室의上下端 두경을제거한後에點火하여初期狀態와同一한

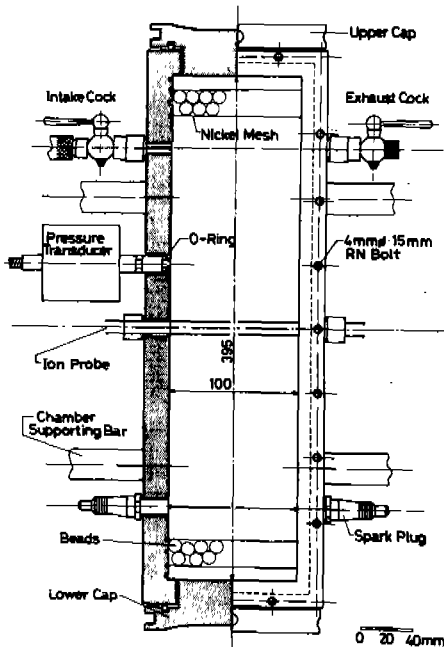


그림. 1. 燃燒室 細部圖

가로 100mm, 세로 100mm, 높이 395mm의四角柱形鋼鐵製燃燒室을 제작하였다. 四角柱形燃燒室

大氣壓下에서 定壓燃燒되도록 하였다. 그러나 燃燒室을 完全히 開放하여 둔 채 燃燒시키면 開放氣柱의 氣柱振動이 發生하므로 D² 이를 방지하기 위하여 두경의 前方에 Nickel Mesh를 附着하고 Mesh 사이에 直徑 8mm의 구슬을 充填시켰다. 實驗結果, 壓力의 變化는 거의 없고 大氣壓初期狀態와 一致함을 確認할 수 있었다. 그리고 氣柱振動에 따른 壓力變動은 전혀 發見되지 않았다.

또한 上下兩端의 두경을 開放하여 두면 燃燒室內에 充填되어 있던 混合비가 多小 變動할 可能性이 있으나 時間 τ 동안의 粒子의 平均擴散距離 λ는 다음 式으로 表示할 수 있다.

$$\lambda = (4D\tau)^{1/2}$$

여기서, λ : 粒子의 平均擴散距離 (cm)

D : 擴散係數 (cm²/sec)

τ : 時間 (sec)

그런데 Propane의 對空氣擴散係數는 0.075 cm²/sec이므로³⁾, 上下兩端의 두경을 開放하고 30秒가 경과되었을 때, 平均擴散距離 λ = 3cm 이고 따라서 上下의 두경을 通하여 約 340cm³이 擴散될 것이나 이것은 燃燒室容積 (3950cm³)에 比較하면 無視할 수 있는 값이며, 實際 燃燒室內에서는 氣柱振動防止用으로 넣은 구슬의 空隙사이로만 擴散이 일어날 것이므로 더욱 小量의 混合氣만 流出될 것이나 擴散에 依한 混合氣의 變動을 考慮하여 모든 實驗은 두경 開放後 30秒以內에 完了하였다.

使用한 點火方式은 市販小型自動車點火方式과 同一한 電流遮斷式 (Current Break System) 을 利用하였으며 點火 Coil은 市販高電壓點火 Coil을 使用하였고 點火回路가 閉鎖될 때 放電되는 것을 防止하기 爲하여 點火回路內에 約 5Ω의 安全抵抗을 挿入하였다. 그림 . 2 에는 點火回路, Ion Gap 回路 및 全體實驗裝置의 概念圖를 나타낸다. 그림에서 보는 바와같이 Oscilloscope의 同期信號는 點火回路의 2次側 誘導電流를 使用하는 外部同期方式을 擇하였다. 그리고 點火

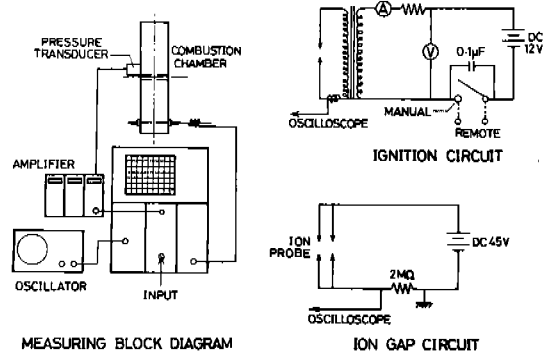


그림. 2. 實驗裝置 概念圖

回路에 電壓計와 電流計를 連結하여 恒時 同一한 點火 Energy를 放出하여 點火토록 하였다.

燃燒室內에 願하는 混合비의 Propane-空氣豫混合氣를 注入시켜 定壓燃燒시키기 爲하여 그림 3과 같은 豫混合氣製作流通路를 構成하였다. 燃料과 空氣의 混合비는 Propane의 體積百分率로 表示하였으며 大氣壓과 混合氣 Tank內의 propane 分壓과 水蒸氣의 分壓에 依하여 算出하였다.

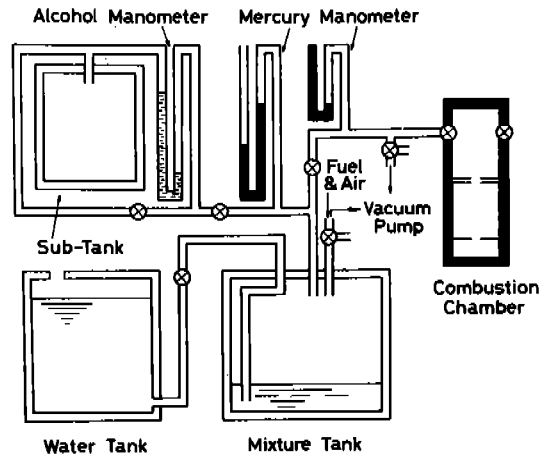


그림. 3. 豫混合氣 製作流通路

本 研究에서는 從來의 方法⁴⁾을 改良하여 Propane Gas의 分壓은 Alcohol Manometer를 使用하였으며 0.5mm Alcohol까지 읽을 수 있으므로, 混合氣濃度의 最大 읽을 誤差는 0.1%

以內에 불과하다. 먼저 眞空 Pump로 混合氣 Tank內의 壓力을 낮춘 後(約360mmHg), 必要한 分壓만큼 Propane을 注入하고 다시 空氣를 大氣壓狀態까지 吸入시킨다. 이때 混合氣 Tank內로 噴出되는 空氣의 攪亂에 依하여 混合氣가 可能한 限 均一하게 混合되도록 하였다. 물 Tank는 混合氣 Tank보다 水位를 높게 하고 位置換法에 依하여 混合氣 Tank內의 壓力을 大氣壓보다 약간 높혀 두었다. 實驗에 使用한 Propane은 市販의 것을 使用하였다. 또한 燃燒室과 混合氣 Tank와의 사이의 管內에는 火焰의 消焰現象(Quenching Phenomena)을 利用한 가는 黃銅網의 火焰遮斷器(Flame Trap)을 두군데 設置하여 實驗者에 對한 安全性을 充分히 考慮하였다.

III. 火焰傳播速度的 測定

III-1. Ion Gap에 依한 火焰傳播 速度測定

1) 實驗裝置 및 方法

Ion Gap法은 火焰內에서 發生하는 Ion 電流를 利用하여 火焰面의 傳播速度를 測定하는 方法이다. 本 實驗에서는 Ion Probe를 製作하여 두 Ion Probe의 中心線을 燃燒室의 正中央(點火栓으로부터 140 mm上部)에 位置토록 設置하고 첫번째 Ion Probe(點火栓으로부터 135 mm上部에 位置함)에 火焰面이 到達하는 時刻과 두번째 Ion Probe(點火栓으로부터 145 mm의 上部)에 火焰面이 到達하는 時刻의 時間差를 測定하였다. 이 實驗에서는 Ion 電流의 最大值 指示時刻을 火焰面이 Ion Probe를 通過하는 時刻으로 取하였다. 實驗에서 使用한 Ion Gap回路는 그림. 2에 表示한다. 電源은 DC 45 V로 하고 Ion Probe에 火焰面이 到達하여 Ion 電流가 發生할 때 抵抗 2 MΩ에 흐르는 Ion 電流出力을 直接 Oscilloscope에 記錄하였다.

使用한 Ion Probe는 直徑 1 mm의 Piano 線을 Acryl 裝着部에 固定시키고 Ion Probe의 끝부분은 針端形으로 加工하여 可能한 限 空間分解能

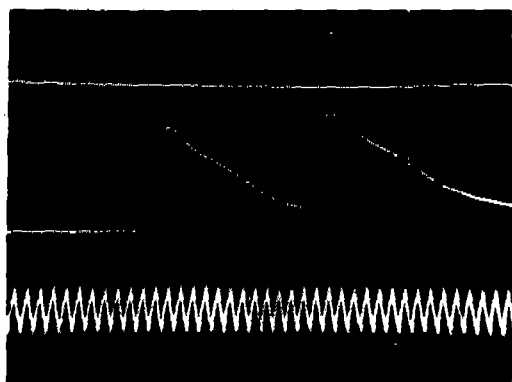
을 增加시키도록 하였으며 Ion Probe의 끝부분을 제외한 다른 部分은 Epoxy Resin으로 塗裝하여 電氣絶緣시켜 Ion Probe間隙사이로 傳播하는 火焰面에서 發生하는 Ion 電流만이 檢出되도록 하고 그 외 다른 部分으로 傳播하는 火焰面에서 發生하는 Ion 電流의 影響은 排除하였다. 左右 Ion Probe間的 間隙은 5 mm로 하고 첫번째 Ion Probe와 두번째 Ion Probe間的 間隙은 10 mm로 固定하였다.

첫번째와 두번째 Ion Probe間的 間隔 10 mm를 傳播하는 火焰의 Ion 電流最大值 指示時間 間隔을 測定하여 燃燒室 中心部에서의 平均火焰傳播速度를 測定하였다.

그리고 Ion Probe에 依한 火焰傳播攪亂影響을 調査하기 爲하여 Ion Probe附近을 傳播하는 火焰의 Schlieren寫眞을 高速度攝影하였다.

2) 實驗結果 및 檢討

Ion Probe에 依한 實驗結果의 1例를 混合比 3.5%에 對하여 그림. 4에 表示한다. Oscilloscope寫眞의 上端은 燃燒室內의 壓力經過를 表示하며 이는 恒常 大氣壓과 同一한 값을 나타



(上) 壓力; 1 Kg/cm²/Division

(中) Ion 電流; 10 Volt/Division

(下) Time Mark; 2 KHz

그림. 4. Ion Probe의 結果(混合比 3.5%)

내고 있다. 中央部는 Ion Probe를 火焰面이 通過할 때의 Ion 電流出力이며 처음 極大値는 火焰面이 첫번째 Ion Probe를 通過할 때의 出力이고 다음 極大値는 두번째 Ion Probe의 出力을 表示하고 있다. 이 實驗에서는 첫번째 Ion Probe를 火焰面이 通過할 때의 Ion 電流極大値 指示時刻과 다음 Ion 電流極大値 指示時刻의 時間差를 測定하였다. 寫眞에서 알 수 있는 것처럼 火焰前面의 豫熱帶 (Preheating Zone)에서 아주 微弱한 Ion 電流가 發生하기 始作하며, 火焰面, 즉 反應帶 (Reaction Zone)에서 極大値를 指示하고 서서히 Ion 電流가 減衰되는 火焰後面 (Postreaction Zone)으로 移動되는 것을 알 수 있다.^{2) 56)} 이에 對하여 檢討하면 Ion Gap法에 의하여 測定된 火焰面의 두께는 約 1.5 mm 정도이나 現在까지 알려진 火焰面 두께에 對한 實驗式

$$\delta = \frac{2.5}{P S_u} \quad (cm)$$

[여기서, δ 는 火焰面 두께 (cm), P는 燃燒室 壓力 (atm), S_u 는 燃燒速度 (cm/sec)]에 依하여 計算하면 約 0.7 mm를 表示하는 點으로 미루어

Ion Probe의 電氣回路에 약간의 應答遲延을 考慮하면 比較的 좋은 測定値를 나타내고 있다. 寫眞의 下端에는 Oscilloscope의 Sweeping Speed 較正을 爲한 2kHz의 Timing Mark를 收錄하였다.

그리고 Ion Probe를 燃燒室內에 挿入하여 火焰傳播速度를 測定할 때 Ion Probe에 依하여 發生되리라 豫測되는 亂流火焰狀態를 觀察하기 爲하여 Ion Probe周圍를 傳播하는 火焰의 Schlieren 高速度攝影을 하였으며 그림. 5에 混合比 4.6%에 對하여 1例를 나타낸다. 撮影 Count數는 2,040 pictures/sec이었다. 寫眞에 表示된 時間은 混合氣가 點火된 後부터 經過된 時間을 表示하고 있다. 이 寫眞을 觀察하면 Ion Probe에 火焰面이 到達하기 以前은 層流火焰面의 形態를 그대로 維持하며 傳播하고 있고 火焰面이 Ion Probe를 通過한 直後까지도 거의 層流火焰 形態로 火焰面이 傳播하고 있으나 그 以後에는 조금씩 Ion Probe에 依한 攪亂의 影響을 받기 始作하여 67.8 msec 後의 경우에는 完全한 亂流火焰 形態로 轉移되었음을 알 수 있다. 이 Schlieren 寫眞으로 미루어 보아 Ion Probe에 依하여도



TIME 44.2 49.1 54.0 58.9 63.8 67.8 msec

그림. 5. Ion Probe의 影響

燃燒 Gas 流動에 큰 影響을 주지 않고 微小區間의 火焰傳播速度測定은 可能하다고 思料된다. 그러나 Ion Probe를 火焰面이 通過한 後에는 亂流成分이 점점 增大되기 始作하므로 全般的인 火焰經過過程을 觀察하기 爲하여 多數의 Ion Probe를 使用하는 것은 좋은 結果를 期待할 수 없을 것이다.

그림. 5의 寫眞上部와 下部에 있는 부분은 燃燒室의 유리窓이 光學的으로 不完全하여 Schlieren 光이 燃燒室 유리窓을 通過하면서 異常的으로 屈折되어 나타난 Schlieren 像이다. Schlieren 寫眞에 對한 詳細한 說明은 다음 節에서 계속한다.

Ion Gap 法에 依하여 測定한 火焰傳播速度의 實驗結果를 各 混合比에 對하여 그림. 6에 나타낸다. 그림의 가로軸은 Propane-空氣 豫混合氣의 體積百分率을 나타내고 있으며 세로軸은 燃燒室 中央部에서의 火焰傳播速度를 表示한다. 最大火焰傳播速度는 理論燃燒混合比 (Stoichiometric Mixture Ratio) 보다 約 14% 過濃側인 混合比 4.6%에서 나타났으며 約 272 cm/sec를 指示하고 있다.

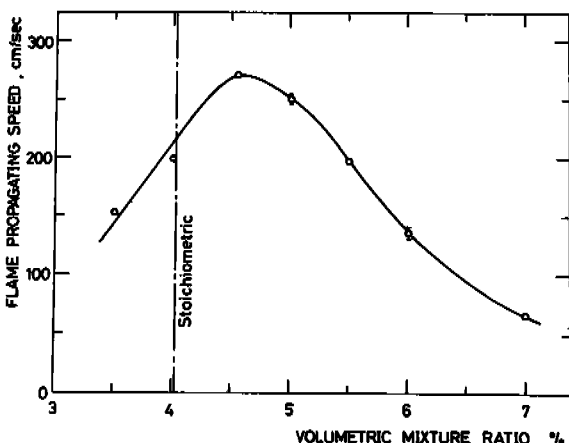


그림. 6. 火焰傳播速度 (Ion Gap 法)

이와같이 最大火焰傳播速度가 理論燃燒混合比 보다 약간 過濃側에서 나타난 것은 炭化水素系統

燃料의 一般的인 特性과 符合되는 結果이다.

III-2. 高速度 Schlieren 寫眞에 依한 火焰傳播速度 測定

1) 實驗裝置 및 그 方法

燃燒室內를 進行하는 火焰傳播形態 및 燃燒室壁에 依하여 發生되는 冷却作用과 亂流影響을 觀察하고 燃燒室內를 進行하는 火焰의 傳播速度를 測定하기 爲하여 高速度Schlieren攝影을 하였다

Propane - 空氣 混合氣는 火焰輝도가 낮아서 直接寫眞이나 Shadowgraph에 依하여는 高速度攝影에 依한 火焰面의 構造와 火焰傳播形態의 觀察이 거의 不可能하여 Schlieren寫眞을 利用하였다.

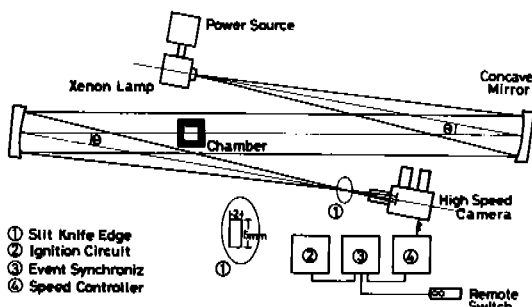


그림. 7. Schlieren 光學配置 및 同期回路

그림. 7은 Schlieren 寫眞光學系 및 高速度攝影系統의 概念圖를 表示한다. 光源은 500 W Xenon Lamp를 使用하였고 光源에서 나온 빛은 光源側 Schlieren Mirror에 依하여 平行光線이 되어 燃燒室의 유리窓을 지나 다음 Schlieren Mirror에 依하여 集束된다. 焦點에는 가로 2 mm, 세로 5 mm의 Slit Knife Edge를 設置하여 Knife Edge外部로 屈折된 빛은 遮斷되어 高速度攝影機의 Film面에 Schlieren 像을 맺게 된다. Schlieren 光學系는 代表的인 平面Z式이며 光軸의 Off-Axis Angle θ 는 約 15° 정도로 可能的인 限 줄이도록 하였다⁷⁾. 使用한 Schlieren Mirror는 有効直徑 250 mm, 焦點距離 2,000 mm

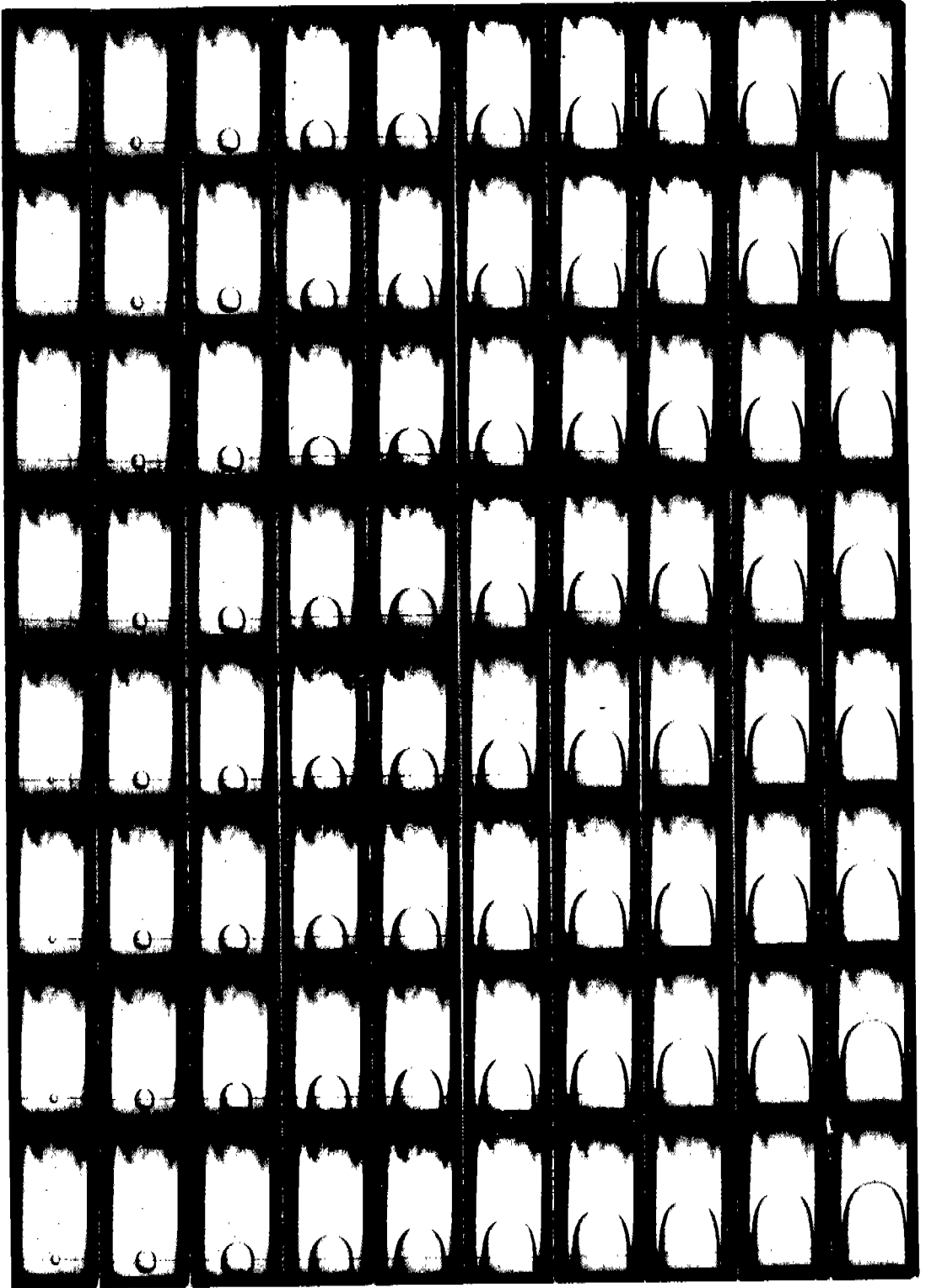


그림. 8 混合比 5%의 Schlieren 寫眞, 撮景速度 2,060 Picture/sec

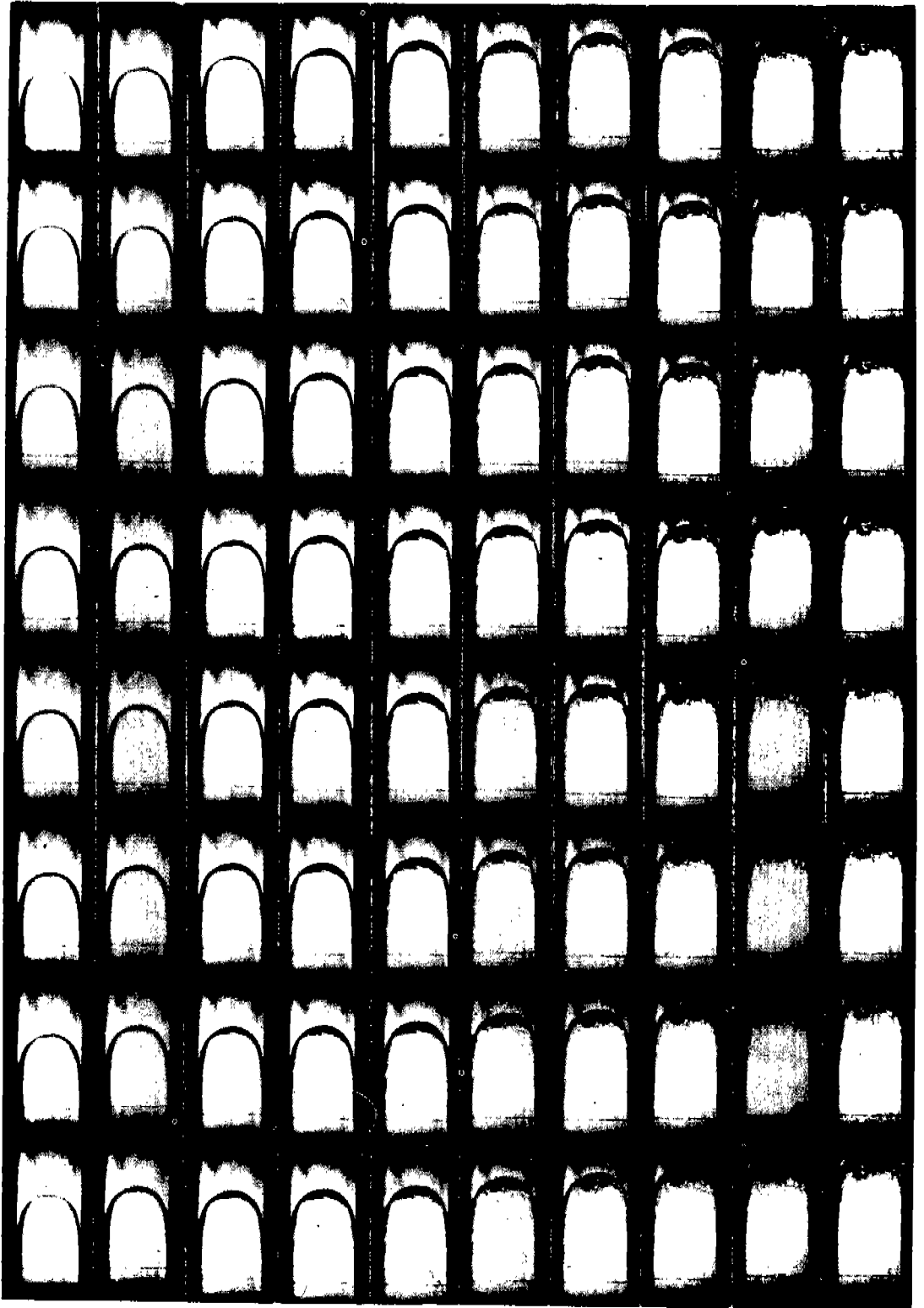


그림. 8 (계속)

의 것이다.

使用한 高速度攝影機는 Hitachi 製 16HM (100~10.00 Pictures/sec까지 撮影可能) 이었으며 本 實驗에서는 約 2,000pictures/sec 의 速度로 撮影하였고 Lens 는 Nikon製 43~86 mm Zoom Lens 이고 高速度攝影用 Film은 Kodak製 7224 (ASA 500) 및 7231 (ASA80) 을 使用하였다.

高速度攝影機의 始動과 點火時期의 同期는 그림. 7에 表示한 바와같이 Event Synchronizer를 作動하여 撮影機가 撮影을 開始하고 指定된 遲延時間後에 Event Synchronizer에서 點火回路의 遠隔點火端子에 點火信號를 주면 燃燒室內의 可燃性混合氣를 點火시켜 高速度攝影機에 火焰傳播 Schlieren 寫眞이 撮影되기 始作한다.

Schlieren 寫眞의 判讀은 Canon 製 Micro film Reader를 使用하여 火焰面의 形態를 觀察하고 火焰傳播速度를 算出하였다.

2) 實驗結果 및 檢討

Schlieren 寫眞에 依하여 火焰傳播를 高速度 撮影한 1例를 混合比 5.0%에 對하여 그림. 8에 表示한다. 그림에서 火焰寫眞의 進行順序는 左側上方으로부터 下方으로 進行된다. 撮影 C-omma數는 2,060 pictures/sec이었다. 이 寫眞을 보면 燃燒初期에는 거의 球狀火焰面이 進行하고 있으나 下向火焰은 燃燒室下方으로 火焰이 消滅되고 上向火焰이 燃燒室上方으로만 進行하고 있다. 이때부터 管内層流火焰의 形態로 傳播하고 있으나 燃燒室中央部를 지난 後에는 燃燒室壁의 冷却作用과 摩擦의 影響으로 火焰傳播速度가 低下되어 火焰面에 攪亂을 形成하게 된다. (寫眞 116番~120番 參照) 대체로 燃燒室中央上部에서부터 셀形態火焰構造(Cellular Flame Structure)가 發展되어 작은 各各의 火焰 pocket를 形成하고 있음을 觀察할 수 있다. 이것은 炭化水素系統燃料에서 混合比가 理論燃燒混合比보다 過濃側에서 發見되는 現象으로서 混合氣의

濃度不均一分布 등으로 誘發되는 一種의 流體安定性問題이다. 이 現象은 Strehlow의 選擇擴散理論(Selective Diffusion Theory)으로 쉽게 說明될 수 있다. 8) 9) 10)

그리고 Schlieren 寫眞에 依하여 測定된 結果의 1例를 混合比 4.6%에 對하여 火焰傳播經過를 그림. 9에 나타낸다. 가로軸은 點火로부터의 寫眞番號이고 세로軸은 各時刻에서의 燃燒室垂直中心線상의 火焰進行距離를 나타내고 있다. 이 結果를 보면 點火栓으로부터 約 10 cm附近 (이것은 Ion Probe보다 約 4 cm下方에 해당된다.)에서 定常狀態의 最大火焰傳播速度를 表示하고 있음을 알 수 있다. 以後 火焰傳播速度는 서서히 減小하기 始作한다. 이와같은 現象은 混合比 5%이하의 稀薄混合氣側과 理論混合氣附近에서는 恒常 同一한 傾向으로 減小하고 있으나, 混合比 5.5%以上の 過濃側에서는 이와 正反對로 燃燒室中心附近에서 火焰傳播速度가 增加하였다. 이 理由는 火焰이 傳播됨에 따라서 火焰面과 既然部가 膨脹하여 未燃 Gas가 燃燒室밖으로 一部 噴出되므로 燃燒室內의 混合氣濃도가 降下한다. 즉 過濃側은 混合比가 減小하여 理論燃燒混合比側으로 移動하게 되어 火焰傳播速度가 약간 增加하게 되고, 理論混合比側과 稀薄混合比側은 더욱 混合比가 稀薄하게 되므로 火焰傳播速度가 서서히 減小하게 된다.

그리고 各 混合比에 따른 셀形態의 火焰構造特性을 比較하기 爲하여 몇가지 混合比의 火焰形態를 調査하였다. 그림. 10에는 混合比 4.0%, 4.6%, 5.0%, 6.0%에 對하여 火焰面이 同一한 位置에 到達하였을 때의 寫眞을 나타낸다. 理論燃燒混合比인 4.0%의 경우에는 전혀 셀火焰構造가 發見되지 않지만 混合比 4.6%의 경우에는 매우 微弱한 셀構造를 發見할 수 있다. 또한 混合比 5.0% 및 6.0%의 경우를 前者와 比較하면 混合比가 過濃側으로 進行할수록 빨리 셀火焰構造가 發達하기 始作한다는 것을 알 수 있다. 以上の 경우는 同一한 位置에 火焰面이 到達하였을 때를 比較한 것이다. 따라서 燃燒室壁

에 의한 冷却作用과 摩擦影響은 거의 同一할 것이므로 火焰의 實構造는 混合氣의 混合比에 依存된다고 推理된다.

그림. 5의 67.8 msec 경우와 同一時刻의 結果이다. 두 寫眞을 比較하면 Ion Probe가 있을 경우에는 實火焰構造 以外에 亂流火焰面構造가 火焰面最前方에서 發見되는 것을 알 수 있다. 이로부터 보아 火焰內에 Ion Probe를 挿入하면 火焰面은 Ion Probe를 通過한 後 비로소 相當한 攪亂을 받게 된다고 생각된다.

그림. 11에는 Schlieren 高速度撮影에 依하여 測定한 火焰傳播速度의 結果를 各 混合比에 對하여 圖示한다. 그림의 가로 軸은 Propane의 體積百分率이며 세로 軸은 燃燒室內를 傳播하는 火焰의 最大火焰傳播速度를 表示한다. 그림內의 막대는 標準偏差를 나타낸다. 最大火焰傳播速度

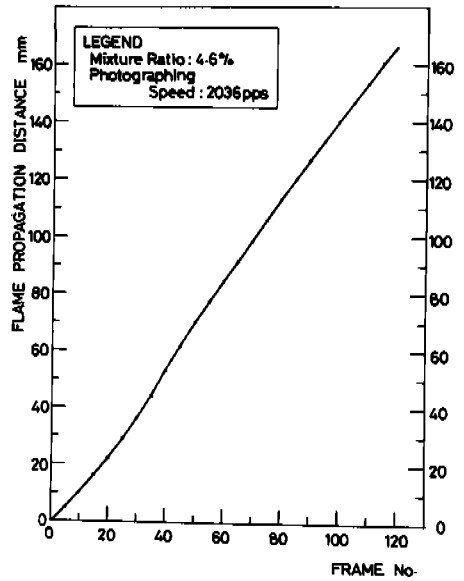


그림. 9. 混合比 4.6%의 火焰傳播經過

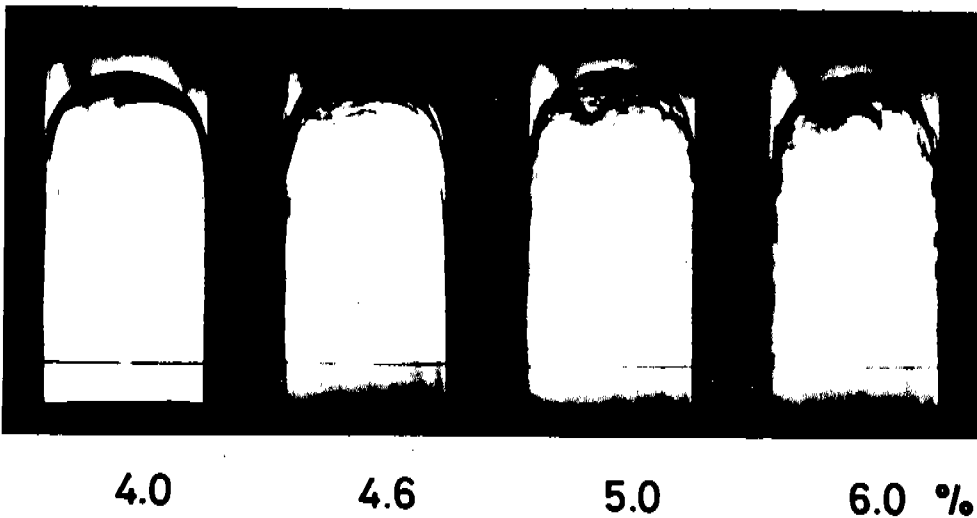


그림. 10. Cell 火焰構造

는 理論燃燒混合比보다 約 14% 過濃側인 混合比 4.6%에서 나타났으며 約 292 cm/sec를 指示하고 있다.

Schlieren 寫眞에 依하여 測定된 火焰傳播速度의 結果와 그림. 6에 表示한 Ion Gap의 結果

를 比較하면 Ion Gap의 結果가 낮게 나타났다. 이 差異는 다음과 같이 說明될 수 있다. 즉 Ion Probe에 依하여 測定된 結果는 點火栓으로부터 約 14 cm上方의 火焰速度이고 Schlieren 寫眞에 依하여 測定된 結果는 燃燒室內를 傳播하는 火焰

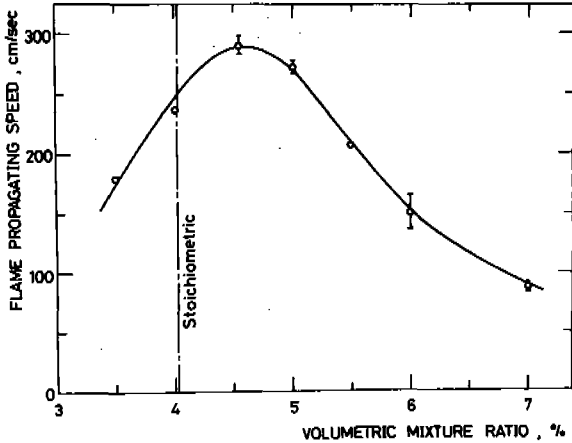


그림. 11. 火焰傳播速度 (高速度 Schlieren 寫眞)

의 最大火焰傳播速度이다. 그림. 9에서 알 수 있는 것처럼 火焰面이 點火栓으로부터 대체로 10 cm 上部에서 最大火焰傳播速度가 나타나고 그以後에는 火焰傳播速度가 서서히 減小하기 始作하므로 Ion Probe에서 測定된 結果는 Schlieren 寫眞에 依한 測定值보다 약간 낮게 나타났을 것이며 火焰面이 Ion Probe를 通過할 때의 冷却效果에 依하여 火焰傳播速度가 더욱 減小되었을 것으로 思料된다. 그림. 5의 49.1 msec 경우는 火焰面이 두번째 Ion Probe를 通過하였을 때 寫眞인데 이 寫眞을 보면 Ion Probe의 冷却效果는 쉽게 짐작할 수 있다. 그리고 Schlieren 寫眞의 火焰傳播經過中에서 點火栓으로부터 14 cm 上方인 點 (즉 Ion Probe 裝着位置) 에서의 火焰傳播速度를 各各 計測한 結果, 이는 Ion Probe에 依한 測定結果와 대략 3% 以內에서 一致함을 確認하였다.

IV. 燃燒速度의 算出

開放四角柱形燃燒室에서 定壓燃燒하여 過渡의 으로 傳播하는 Propane-空氣 混合氣의 燃燒速度를 算出하였다.

먼저 (a) 火焰面前後의 壓力差는 無視할 수 있

다. (b) 定常狀態 (Steady State) 이다.

(c) 燃燒室과 周圍雰圍氣는 斷熱의이다. (d) 火焰溫度는 斷熱火焰溫度 (Adiabatic Flame Temperature) 를 따른다. (e) 狀態變化는 定壓變化이라고 假定한다.

그리고 未燃側의 體積, 溫度, 密度, 燃燒速度를 各各 V_u, T_u, ρ_u, S_u 로 두고 既燃側의 體積, 溫度, 密度, 火焰傳播速度를 各各 V_b, T_b, ρ_b, S_b 로 두면 定常狀態의 連續方程式은

$$\nabla \cdot (\rho \vec{S}) = 0$$

즉 $\rho_u S_u = \rho_b S_b$ 이다.

그리고 定壓變化라고 假定하였으므로

$$V_b/V_u = T_b/T_u$$

이고, 또

$$\rho_u V_u = M_u, \rho_b V_b = M_b$$

단, M_u 는 反應物質의 分子量, M_b 는 生成物質의 分子量을 表示한다.

以上の 式을 整理하면, 燃燒速度 S_u 는

$$S_u = S_b \cdot \frac{T_u}{T_b} \cdot \frac{M_b}{M_u}$$

로 表示된다.

本 實驗에서는 初期溫度 T_u 는 298° K, 初期壓力은 1 atm으로 두고 火焰溫度 T_b 는 化學平衡의 로부터 斷熱火焰溫度를 計算하였다.^{11) 12)} Propane - 空氣-混合氣에 對한 斷熱火焰溫度, 分子量比 等은 表. 1에 各 混合比에 對하여 提示한다.

Schlieren 高速度攝影에 依하여 測定된 火焰傳播速度의 結果를 利用하여 Propane-空氣 混合氣의 燃燒速度를 算出하고 그 結果는 그림. 12에 表示한다. 그림의 가로軸은 Propane 體積百分率을 나타내고 세로軸은 混合氣의 燃燒速度를 나타낸다. 最大燃燒速度는 理論燃燒混合比보다 약간 過濃側인 混合比 4.6%에서 나타났으며 그 값은 約 36 cm/sec를 指示하였다. 그리고 M. Gerstein 等의 測定結果¹³⁾ 및 Morrison 等의 測定結果¹⁴⁾ 와 比較하였다. 本 實驗의 結果는 Gerstein 및 Morrison의 測定結果와 比較的 잘 一致하고 있으며 약간의 差異는 實驗方法上의 差異

〈表 1〉 Some Properties of Combustion Gas C_3H_8

Mixture Ratio (%)	Molecular Weight of Reactants, M_u	Molecular Weight of Products, M_p	Ratio of Molecular Weight, M_p/M_u	Adiabatic Flame Temperature, °K
3.2	29.3565	28.3926	0.9672	2050
3.6	29.4165	28.2752	0.9612	2187
4.0	29.4759	28.0575	0.9519	2273
4.4	29.5349	27.6629	0.9366	2273
4.8	29.5934	27.1561	0.9176	2210
5.2	29.6514	26.6434	0.8986	2133
5.6	29.7090	26.1489	0.8802	2056
6.0	29.7661	25.6755	0.8626	1981
6.4	29.8227	25.2230	0.8458	1909
6.8	29.8789	24.7906	0.8297	1839
7.2	29.9347	24.3770	0.8143	1770

* Conditions; Enthalpy $H = -24,820$ cal/Mole, $O_2 = 20.95$ %, $N_2 = 78.09$ %, Ambient Temperature = 298 °K Ambient Initial Pressure = 1 atm

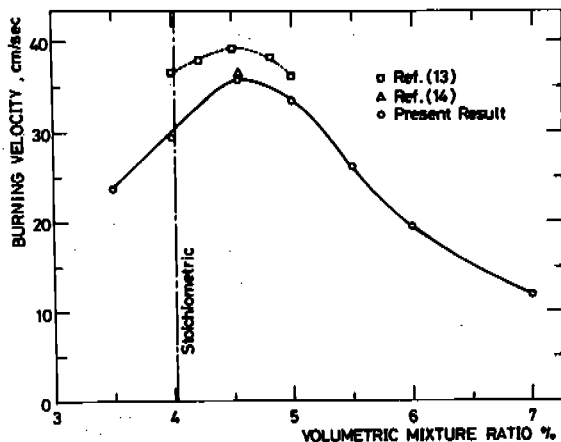


그림. 12. 燃燒速度

로 推測된다. 즉 Gerstein은 水平으로 設置된 直徑 2.8 cm 길이 57 cm의 燃燒室內를 傳播하는 Propane - 空氣 混合氣에 對하여 未燃 Gas의 平均速度와 火焰面의 面積을 測定하여 燃燒速度를 算出하였다. 이 方法에서는 水平圓柱型 燃燒室을 使用하여 直接寫眞을 찍었으므로 G. E. Andrew 等¹¹⁾이 指摘한 바와같이 浮力의 影響으로 火焰面이 非對稱形이므로 測定에 實驗誤差가 크게 左右되었을 것이다. 勿論 本 實驗에 있어서는 火焰溫度를 斷熱火焰溫度로 假定하였으나 燃燒室壁으로 傳導되는 熱量損失이 있을 것이므로 眞燃燒速度는 算出된 값보다는 약간 높은 값이 될 것이다.

V. 結 論

參 考 文 獻

初期狀態가 大氣壓 및 室溫인 狀態下에서 開放 燃燒室內의 Propane - 空氣 可燃性混合氣中을 電氣點火에 依하여 傳播하는 火焰의 傳播速度를 Ion Gap 法, Schlieren 高速度攝影을 利用하여 測定하였다. 그리고 Schlieren 高速度攝影에 의 하여 測定된 火焰傳播速度로부터 燃燒速度를 算出하였다. 本 研究에서 얻어진 結論을 要約하면 다음과 같다.

(1) Propane - 空氣 混合氣의 火焰傳播速度를 Ion Gap에 依하여 各 混合比에 對하여 測定하였으며 燃燒室中心部에서의 平均火焰傳播速度는 理論燃燒混合比보다 14% 정도 過濃側인 混合比 4.6%에서 最大値가 나타났으며 그 값은 約 272 cm/sec이었다.

(2) 火焰傳播經過過程을 觀察하기 爲하여 多數의 Ion Probe를 裝着하는 것은 Ion Probe를 通過한 後 Ion Probe의 影響으로 亂流火焰을 形成하므로 좋은 測定結果를 期待할 수 없다. 이것은 Schlieren 高速度攝影에 依하여 確認되었다.

(3) Propane- 空氣 混合氣의 火焰傳播速度를 Schlieren 高速度攝影에 依하여 測定 하였으며 最大火焰傳播速度는 混合比 4.6%에서 나타났고, 그 값은 約 292 cm/sec이었다.

(4) 過濃混合比側에서 Schlieren 高速度 攝影에 依하여 셀形態火焰構造를 發見할 수 있었으며 過濃側으로 進行할수록 셀構造는 顯著하게 나타났다.

(5) Schlieren 高速度攝影에 依하여 測定된 火焰傳播速度結果로부터 燃燒速度를 算出하였으며 最大燃燒速度는 混合比 4.6%에서 約 36 cm/sec이었고 他 實驗結果와 比較하여 잘 一致하였다.

後 記

本 研究는 1978 年度 韓國科學財團 研究費에 依하여 遂行된 研究結果의 一部이며 當財團의 財政의 支援에 深甚한 謝意를 表한다.

1. 酒井忠美, 槻木公一; 音場内の火焰傳播, 機械の研究, 第 22 卷 第 7 號, 1970, pp.995~1001
2. 平野敏右, 益子一郎, 野木映美; 傳ば火炎の探針測定, 日本機械學會論文集, 第 42 卷 第 364 號, 1976, pp. 3974~3982.
3. 佐藤一雄; 物性定數推算法, 丸善, 1974, p.86.
4. 趙慶國, 鄭仁碩; 傳播火炎에서의 火炎溫度測定에 關한 研究, 大韓機械學會論文集, 第 1 卷 第四號, 1977, pp.182~189.
5. 大東俊一, 浜本嘉輔; ガソリン機關における 點火遅れと火炎傳ば, 日本機械學會論文集, 第 36 卷 第 282 號, 1970, pp. 295~302.
6. K.T.Rhee, K.K.Cho, &H.C.Kim; A Study of Flame Quenching in Closed Chamber, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 11, No. 4, 1971, pp. 255~265.
7. A.G.Gaydon & H.G.Wolfhard; Flames, Chapman and Hall, 1970, p. 42.
8. R.A.Strehlow; Fundamentals of Combustion, International Textbook Company, 1968, pp. 221~227.
9. G.H.Markstein; Instability Phenomena in Combustion Waves, 4th Symposium (International) on Combustion, 1952, pp.44~59, pp. 527~535.
10. J.C.Leyer & N.Manson; Development of Vibratory Flame Propagation in Short Closed Tubes and Vessels, 13th Symposium (International) on Combustion, 1970, pp. 551~558.
11. G.E.Andrews & D.Bradley; Determination of Burning Velocities; A Critical Review, Combustion and Flame, Vol. 18, 1972, pp.133~153.

- 12 水谷幸夫：燃燒工學，森北出版，1977，pp. 61~67.
- 13 M. Gerstein, O. Levine & E. L. Wong; Flame Propagation II. The Determination of Fundamental Burning Velocities of Hydrocarbons by a Revised Tube Method, J. American Chem. Soc., Vol. 73, 1951, pp. 418~422.
- 14 Morrison & Dunlap; Measurement of Flame Speeds with the V-Flame, Univ. of Michigan Report No. UMM-21, 1948.
-