

## 液化天然가스燃焼器開發에 관한 研究

崔炳輪\*·吳相憲\*·金德茁\*\*

A Study on the Development of Liquefied Natural Gas-Fired Combustor

B. R. Choi, S. H. Oh, D. J. Kim

### Abstract

The present research attempts to examine the combustion characteristics and the structure of the flame in tubulent premixed flames and thus enhance the combustion performance that leads to the design of the effective combustion system (utilizing LNG)

Following experimental investigations for several stabilized premixed flames were attempted to identify the interactive mechanism between flame structures and flow fields; Visualization by Schlieren method, measurement of flow velocity by LDV, detection of ion current by ion probe, measurement of fluctuating temperature by thermocouple having compensation circuit, average values with respect to time of fluctuating amount for flow velocity, temperature, ion current, etc., variable RMS values, PDFs, autocorrelation, cross-correlation, spatial macroscale, power spectra, and velocity scale.

Continuing the authors published studies whose flame dominated by coherent structures and the characteristics of combustion reaction for irregular three dimensional flame and stabilized flame by step were investigated with obtained experimental quantities.

Results of this research are following :

The most turbulent flames support the structure of a Wrinkled laminar flame or laminar flamelets. It also observed that combustion reaction is related to small tubulence microscales of the turbulent flow fields closely.

### 1. 序 論

工業用爐 및 內燃機關을 비롯한 各種 燃焼器에서는 거의 대부분이 亂流流動場에서 燃焼가 일어난다. 그럼에도 불구하고 아직도 그 基礎研究가 확고한 現象論的 基盤위에 物理的으로 모순이 없는 亂流燃焼의 모델을 發表하기에 이르

지 못하고 있는 實情이며,<sup>1,2)</sup> 따라서 現在로서는 理論解析으로 流動條件에 따른 反應帶에 있어서의 燃焼特性, 亂流스케일과 火焰面學動의 相關, 亂流火焰의 微視的構造 등을 解明할 수 없기 때문에 工業上의 燃焼技術을 向上發展시키고 나아가서 亂流燃焼理論을 확립시키기 위한 순수한 現象的 立場에서 수행되는 研究의 意義

\* 正會員, 釜山大學校 工科大學 機械工學科(燃焼工學)

\*\* 正會員, 釜山大學校 工科大學 機械設計學科(熱工學)

는 매우 크다고 思料된다.

本研究는 各種 燃燒器에 있어서 亂流剪斷層, 循環流 및 그 下流에 形成되는 亂流豫混合火焰을 對象으로 하여 그 微視的構造를 暴 힘과 同時에 流動場의 性狀과 燃燒反應特性과의 相關을 상세하게 조사함으로써 液化天然가스(LNG) 燃燒技術의 向上과 効率的인 燃燒機器의 設計를 위한 基礎研究를 目的으로 수행된 것이다.

亂流豫混合火焰의 構造에 關해서는 1940년 G. Damköhler에 의해 Wrinkled laminar flame 이 提案<sup>3)</sup>된 이래 그 構造의 存在가 슈리이렌사 진에 의해 確認<sup>4)</sup> 되었으나 그 特性의 定量的인 解明을 위한 研究가 시작된 것은 극히 最近의 일이다. 그후 Summerfield등에 의해 Distributed reaction zone model<sup>5), 6)</sup>이 提案되어 그 存在도 確認되었으나 이것의 定量的인 特性에 關한 研究發表는 아직까지도 없으며, 剪斷層에 形成되는 渦에 關해서도 많은 流體工學分野學者들의 發表가 있으나 燃燒反應과 關련된 研究는 매우 적고 특히 豫混合火焰에 關해서는 Sawyer 등이 Step後流의 渦의 構造를 조사<sup>7)</sup>하고 있는 정도이다.

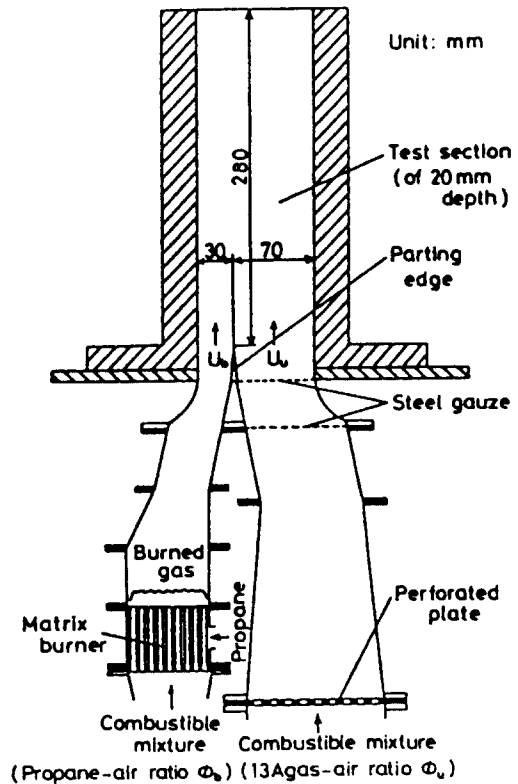
本 研究에서는 流動場 및 火焰에 대하여, (1) 슈리이렌법에 의한 可視化, (2) Laser doppler 流速計에 의한 流速測定, 靜電探針에 의한 이온電流의 檢出, 補償回路를 갖는 熱電對에 의한 脈動溫度의 測定 및 이들의 同時測定도 병행, (3) 流速, 溫度, 이온電流등의 脈動量의 時間平均値, 變動의 rms值, 離率密度分布(PDF), 自己相關, 相互相關, 空間마크로스케일, Power spectra, 速度스케일 등을 求하여 亂流剪斷層에 있어서 筆者가 이미 發表한바 있는 Coherent渦에 支配되는 火焰<sup>8)</sup>과 圓柱保焰器에 의해 安定化시킨 火焰<sup>9)</sup>에 계속하여, 不規則한 3次元渦에 支配되는 火焰 및 Step에 의해 安定化시킨 火焰등에 대한 微視的構造와 燃燒反應特性을 調查研究하였다

## 2. 實驗裝置 및 方法

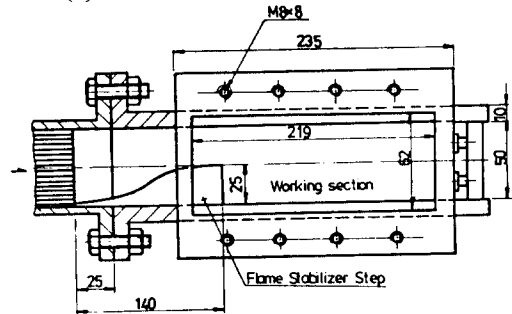
### 2.1. 實驗裝置

本 實驗에 사용한 燃燒器는 Fig. 1과 같으며

Fig. 1(a)는 高溫燃燒가스流와 混合氣流가 平行으로 流入하는 경우의 不規則한 3次元渦에 支配되는 火焰을 形成시키기 위해 만들어진 燃燒器로서 Parting edge의 左側流路에서는 高溫燃燒가스가 右側으로 부터는 未燃混合氣가 送入되어 兩者의 境界에 形成되는 剪斷層에서 混合되므로써 亂流火焰이 形成된다. Fig. 1(b)는 Step後流



(a) Combustion chamber with matrix burner



(b) Combustion chamber with flame stabilized step

Fig. 1. Experimental apparatus

의 高温循環流에 의해 安定化되는 火焰을 열기 위해  $50 \times 50 \times 250\text{mm}$ 의 流路에 Blockage ratio가 0.5인 流線形의 스텝을 設置한 경우이며, 光學的인 觀測을 위해 前後壁은 Vycor로 되어있다.

2.2. 實驗方法

流動場 및 火焰의 定性的인 特性을 조사하기 위해 슈리이렌 瞬間攝影 및 高速度攝影으로 可視化하였고, 火焰帶의 이온電流의 測定은 線徑 0.1mm의 P<sub>t</sub>-R<sub>n</sub> 13% 合金을 靜電探針으로 檢出

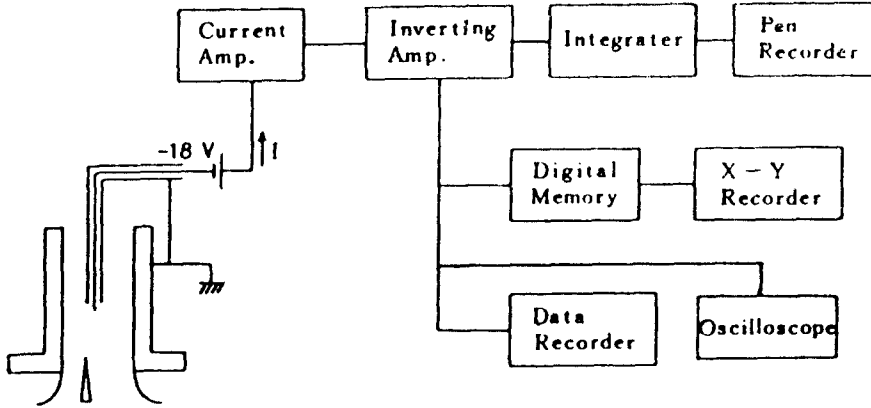


Fig. 2. Measuring system of ion current

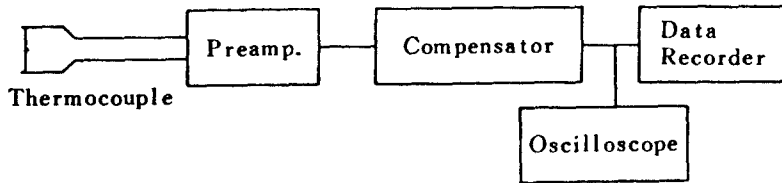


Fig. 3. Measuring system of temperature fluctuation

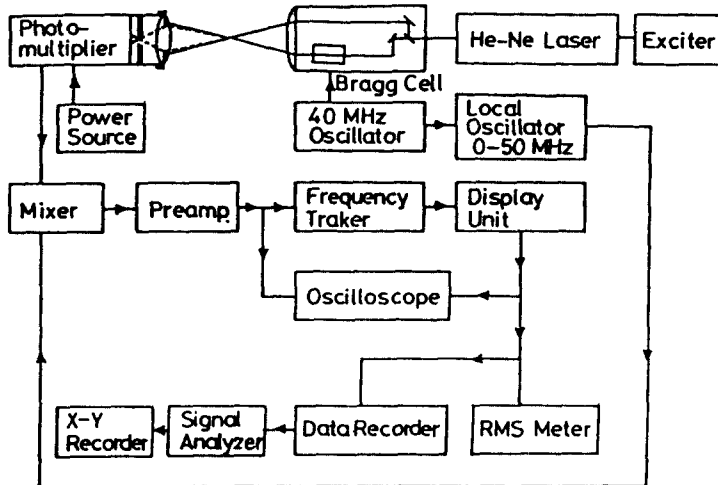


Fig. 4. Measuring system of velocity fluctuation

하였으며, 그測定系는 Fig. 2와 같다. 溫度變動의測定은 素線徑 25 $\mu$ m의  $P_t/P_t-R_h$  13%의 熱電對를 같은 材質의 直徑 0.5mm의 支柱에 각각 溶接시켜 사용하였으며, 이測定系는 Fig. 3과 같다. 流速과 亂流強度는 公稱出力 15mW의 He-Ne LDV로 그測定系 및 信號處理系는 Fig. 4와 같으며, Tracker의 瞬時出力電壓을 데이터레코오다에 수록한 후 Signal analyzer로 流速脈動의 PDF, 流速變動의 rms值, 自己相關係數, 相互相關係數 및 Power spectra 등을 算出하였다.

實驗데이터의 표시에는 Parting edge의 先瑞(Fig. 1(a)의 경우) 및 스텝上面의 先瑞(Fig. 1(b)의 경우)을 각각 原點으로 하여 下流方向으로  $x$ 軸을 流動의 直角方向으로  $y$ 軸을 잡아 표기하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 不規則한 3次渦에 支配되는 火焰

Fig. 1(a)의 燃燒器에 平行으로 流入되는 高溫 燃燒가스流(流速  $U_b=30$ m/s, 溫度  $T_b=2000$ K, 當量比  $\phi_b=1.0$ )와 未燃混合氣流(流速  $U_a=10$ m/s, 當量比  $\phi_a=0.78$ )의 境界에 形成되는 剪斷層의 構造 및 亂流豫混合火焰의 微視的 構造와 流動場의 性狀을 實驗研究한 結果는 다음과 같다.

##### 3.1.1. 變動量의 分布와 火焰構造

###### (a) 火焰內的 諸量의 分布

Fig. 5는  $x=200$ mm 斷面에 있어서의 諸量의 時間 平均值 및 變動의 rms值를 나타낸 것이다. 平均이온電流( $I$ )와 그 變動의 rms值( $\tau'$ )가 어느 정도의 크기를 나타내는 範圍(水平橫方向  $y=0\sim 20$ mm)를 時間平均的인 反應帶로 보면,  $I$ 와  $\tau'$ 는 反應帶의 中央附近에서 最大值가 되며, 平均溫平( $\bar{T}$ )의 最大勾配位置와 溫度變動의 rms值( $t'$ )의 最大位置는 反應帶의 未燃混合氣側에 치우쳐 存在한다. 또 反應帶에서  $y$ 方向 流速( $\bar{V}$ )의 勾配가 생기며, 이는  $I$ 의 最大位置를 中心으로 해서 流速方向이 正負 逆轉하는데, 이것은 燃燒反應에 따른 熱膨脹에 의한 것이라 생각된다. 反應帶에서도  $x$ 方向流速  $\bar{U}$ 의 勾配가 나타남을 보아서

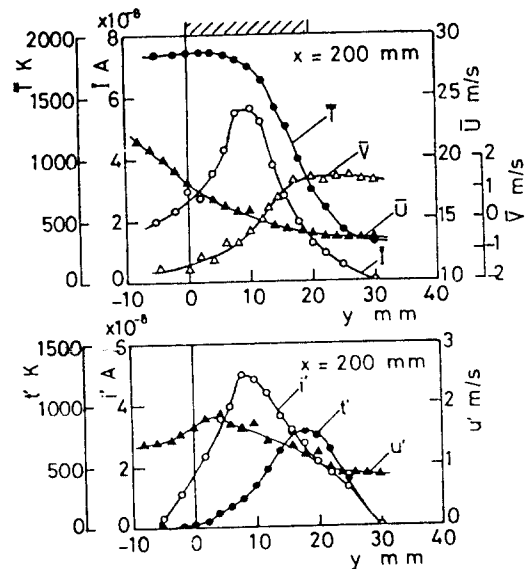


Fig. 5. Time-averaged values and RMS values of fluctuating quantities.

剪斷層이 넓어지고 있으나, 본래의 剪斷層이 存在한 高溫가스流側으로 치우친 位置에서 勾配가 크고, 變動의 rms值( $u'$ )의 피이크도 反應帶 中央으로부터 高溫가스側으로 치우친 位置에 나타난다.

###### (b) 溫度變動과 火焰構造

溫度脈動( $T$ )의 確率密度分布(PDF)는 Fig. 6과 같다. 反應帶에서는 燃燒가스溫度 1800K 근방과 室溫 300K 근방에서 각각 피이크를 갖는 雙峰性 分布가 나타나고, 이들의 中間溫度를 나타내는 確率は 매우 낮다. 高溫가스流 側으로 감에 따라 점차 低溫의 피이크가 나타나는 確률이 低下됨과 동시에 피이크 位置도 高溫側으로 옮겨진다. 그러나 混合氣流側에서는 燃燒가스에 對應하는 高溫의 피이크가 나타나는 確률은 低下되나, 피이크의 位置는 거의 變하지 않는다. 즉 狹은 反應面을 사이에 두고 燃燒가스와 未燃混合氣가 接하는, 소위 Wrinkled laminar flame 혹은 Laminar flamelets에 가까운 火焰構造를 갖는다고 생각된다.

###### (c) 이온電流變動과 火焰構造

Fig. 7은 이온電流脈動的의 PDF이다.  $y=14\text{mm}$ 의 分布를 보면, 未燃混合氣에 對應하는  $0\text{A}$ 와 既燃가스에 對應하는  $2 \times 10^{-8}\text{A}$ 의 피이크 및 反應中の 가스에 對應하는 높은 電流值에 대해 比較的 平활한 確率密度가 分布되어 있으며  $1 \times$

$10^{-7}\text{A}$ 附近에 미소한 피이크가 보인다. 高溫가스 側으로 감에 따라 既燃가스에 對應하는 피이크는 增大되고, 反應中の 가스가 나타나는 確率は 점차 低下되어 간다. 이것은 Fig. 8(a)의 脈動波形에 나타나 있는 간헐적인 스파이크狀의 反應

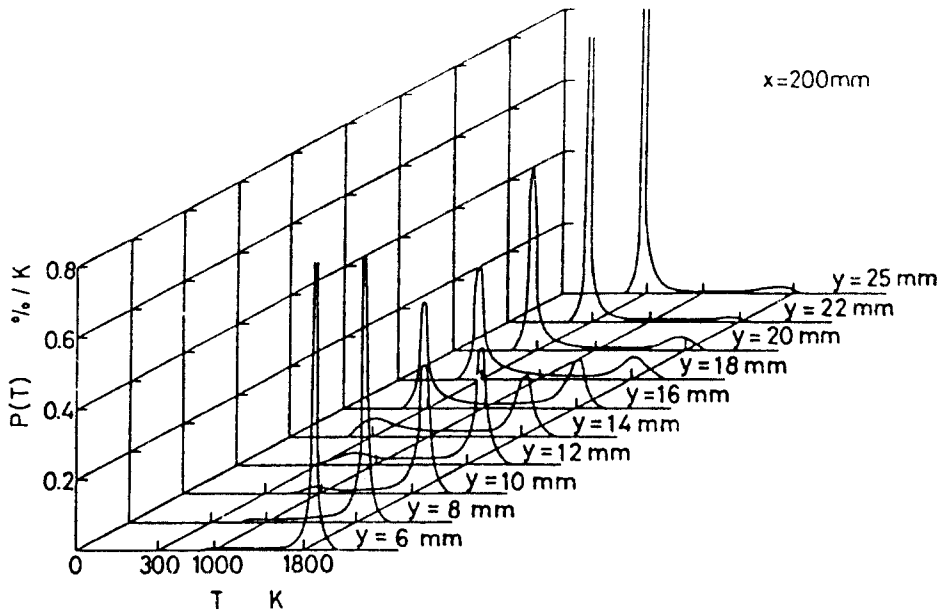


Fig. 6. PDF of temperature fluctuations.

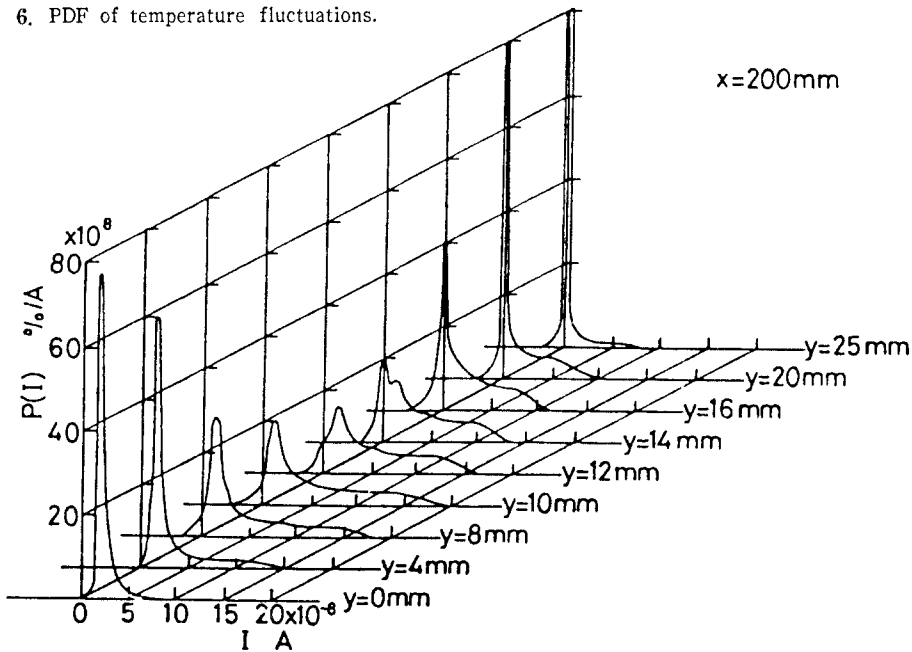


Fig. 7. PDF of ion current fluctuations

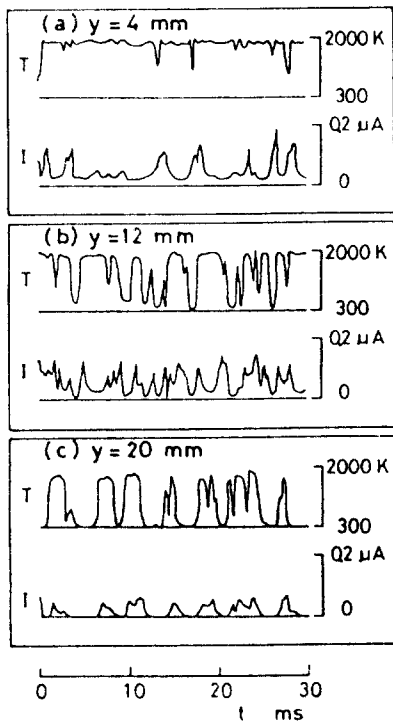


Fig. 8. Wave form of temperature and ion current fluctuations by simultaneous measurement ( $x=200\text{mm}$ ,  $\phi_u=0.78$ )

의 존재와 對應한다. 또 混合氣流側에서는 이온濃度가 低下되기 때문에 檢出되는 이온電流值도 낮고 既燃가스와 反應中의 氣의 區別이 不明確하다. 그러나 Fig. 8(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 同時測定의 溫度脈動波形과 對比시켜서 고찰해보면 高溫가스塊가 反應面에 둘러 쌓여있다고 생각해도 좋을 것이다. 따라서, 前述한 火焰構造를 입증하고 있다고 말할 수 있다.

### 3.1.2. 變動量의 相關關係

#### (a) 變動量의 相互相關

流速, 溫度, 이온電流중의 두가지씩을 組合시킨 3種의 同時測定(U-T, U-I, T-I)을 해서 各各의 變動波形相互의 關係를 調査했는데, 2種의 變動波形의 統計處理結果에서 測定點이 떨어져 있음에 따른 지연시간을 補正해서 同時同位置에 있어서의 相互相關係數  $R(0,0)$ 를 求했다. Fig.

9의  $x=200\text{mm}$  斷面에서는 溫도와 이온電流의 相關係數  $R_{TI}(0,0)$ 는 反應帶 中央에서 약간 高溫가스側으로 치우친 곳에서 正·負逆轉되는 傾向이 보인다. 反應帶의 未燃混合氣側에서는 매우 높은 正의 相關을 볼 수 있으며, 이 部分에서는 燃燒反應(이온電流의 增大)이 高溫燃燒가스塊와 결부되어 있음을 알 수 있다(Fig. 8(c)). 또 한편 이와는 대조적으로 高溫가스側에서는 完全히 燃燒된 既燃가스에 대해서 이온電流는 低下되므로, 이 部分에서의 燃燒反應은 高溫가스중에 섞여 들어온 低溫의 未燃混合氣塊에 결부된다고 할 수 있다(Fig. 8(a)).

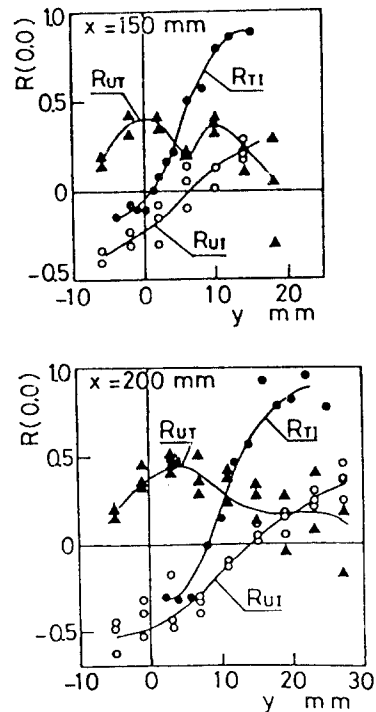


Fig. 9. Distribution of crosscorrelation coefficients ( $\phi_u=0.78$ )

流速과 이온電流의 相互相關係數  $R_{UI}(0,0)$ 는 高溫가스側에서 負의 값이 되고 反應帶 中央으로부터 未燃混合氣側에서 작은 正의 값으로 變化되고 있다. 따라서 이 근처의 係數가 작은 값을 고려할때 이 兩者의 相關은 그다지 세지 않다고 생각함이 타당할 것이다. 高溫가스側에서의 傾向은 流速의 y方向勾配가 큰 곳에서 低

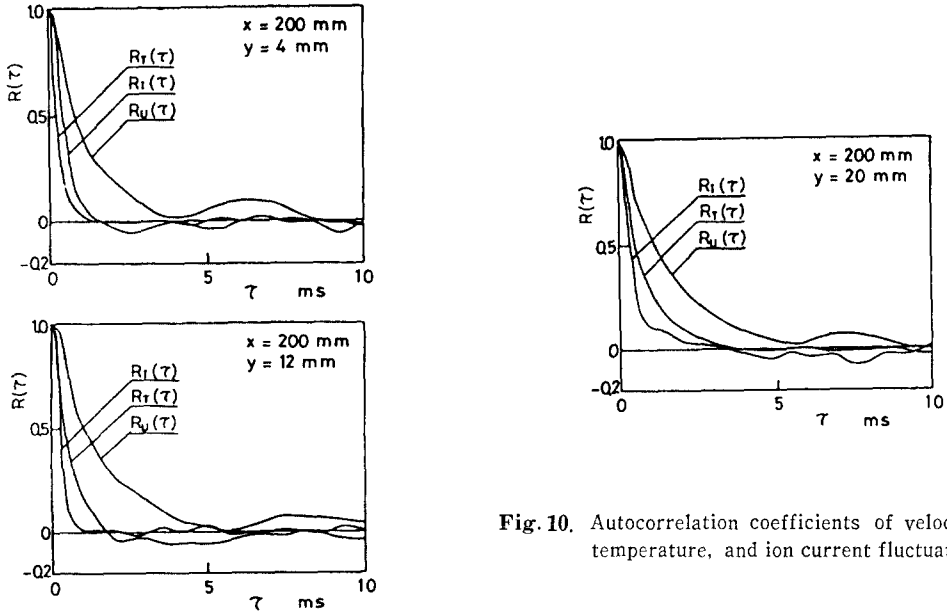


Fig. 10. Autocorrelation coefficients of velocity, temperature, and ion current fluctuations.

速의 未燃混合塊가 혼입된 경우에 이온電流가 增大되는 傾向과 對應하나, 反應帶에서 全體의 으로 相關이 약한 것은 流速變動의 信號가 LDV의 測定體積의 平均的인 流速이 잠히는 點과 散亂粒子的 間缺性 등에 의해 약한 質이 낮은 點에도 영향이 있다고 보여진다. 따라서 流速과 溫度의 相關係數  $R_{UT}(0,0)$ 에 대해서도 比較的 작은 값이며  $R_{UI}(0,0)$ 의 傾向과를 결부시켜 고찰하면 燃焼反應의 變動에 관련되는 渦의 스케일은 流速變動에 관련되는 스케일보다 상당히 작은 것으로 推測된다.

(b) 變動의 스케일과 火焰構造

Fig. 10은  $x=200\text{mm}$  斷面에 있어서 時間平均的인 反應領域을 中心으로 3點을 택하여, 同一點에서의 流速, 溫度, 이온電流의 自己相關係數  $R_U(\tau)$ ,  $R_T(\tau)$ ,  $R_I(\tau)$ 를 比較한 것이다. 모든 位置에 있어서  $R_U(\tau)$ 의 감소율이 가장 늦으며, 이것은 溫度와 이온電流의 變動에 比較해서 流速의 경우가 큰 渦의 레벨에서 變動하고 있음을 나타내고 있다. 이 原因으로서는 한개의 渦로서 變動하고 있는 流體塊의 内部에 더 작은 스케일에서 溫度의 高低의 分布와 反應의 強弱이 分布되어 있다고 생각되어지나, 前述한 바와같이

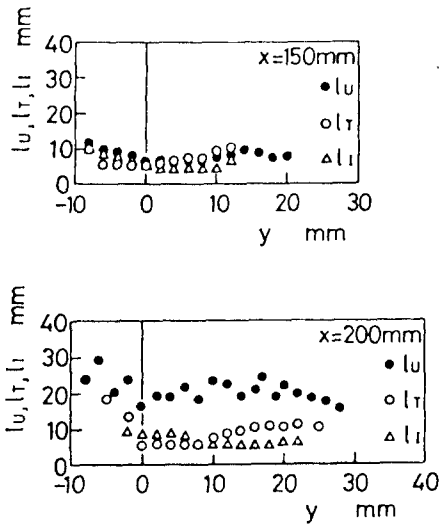


Fig. 11. Comparison of spatial macro scales

LDV의 測定體積이 他의 probe에 비해 큰 영향도 함께 고려해야 될 것이다.  $R_T(\tau)$ 와  $R_I(\tau)$ 는 매우 급격한 감소율을 나타내고 있으며 이것은 溫度波형과 이온電流波형은 全反應領域에 있어서 랜덤성이 강한 信號임을 알 수 있다.

Fig. 11은 自己相關係數  $R(\tau)$ 의 값이  $1/e$ 인 點의 時間스케일에 그 點의 平均流速( $\bar{U}$ )을 곱해서 算出한 空間마크로·스케일을 나타낸 것이다.

火焰의 擴大初期段階인  $x = 150\text{mm}$  斷面에서는 큰 차가 없으나,  $x = 200\text{mm}$  斷面에서는  $R_U(\tau)$ 로 부터 導出한 流速變動의 마크로 스케일  $1_U$ 는  $R_T(\tau)$  및  $R_I(\tau)$ 로 부터 導出한 溫度 및 이온電流變動의 마크로·스케일  $1_T$  및  $1_I$  보다 큰 값으로 되어 있음은, 火焰이 擴大된 경우의 火焰 및 燃燒가스中에서 流速變動 즉 亂流의 스케일은 커짐에 대해 燃燒反應은 變함없이 그 内部의 작은 微小 스케일 즉 凸凹 및 주름에 대응하는 레벨에서 變動한다는 것을 알 수 있다. 따라서 燃燒反應과 밀접하게 결부되어 있는 이온電流變動 및 溫度變動은 流速變動에 비해서 微小한 스케일에 관련된

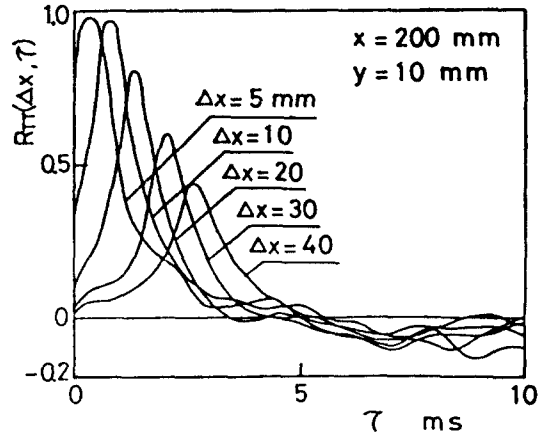


Fig. 12. Variation of time and spatial crosscorrelated temperature fluctuations.

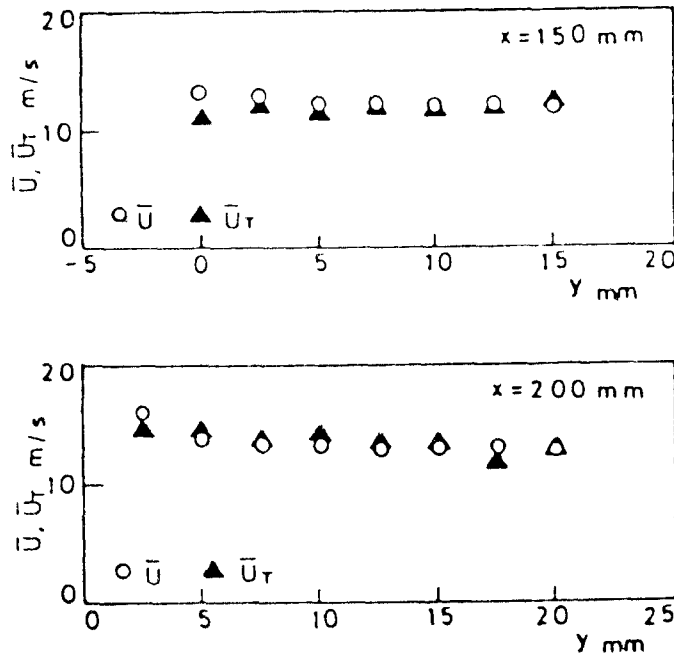


Fig. 13. Convection velocity and time averaged velocity of temperature fluctuations

다고 볼 수 있다.

Fig. 12는  $x$ 방향으로  $\Delta x$  만큼의 간격을 두고 설치한 2개의 溫度 probe에 의한 溫度變動波形的 同時 測定結果로 부터 求한 溫度變動의 時間·空間相互關係數  $R_{TT}(\Delta x, \tau)$ 의 一例이다.

Fig. 13은  $R_{TT}(\Delta x, \tau)$ 에 있어서,  $\Delta x$ 와  $R_{TT}(\Delta x, \tau)$ 의 피크에 對應하는 지연시간  $\tau_m$ 로부

터  $\Delta x/\tau_m$ 로 해서 求한 溫度變動의 平均對流速 度  $\bar{U}_T$ 와 平均流速  $\bar{U}$ 를 比較한 것이며 兩者는 잘 一致되고 있다.

이것은 溫度變動이 流速에 비해서 작은 스케일의 亂流와 관련되어 變動하고는 있으나 그 變動은 平均流에 의해서 그대로 운반되고 있다고 할 수 있다.



3.2. 스텝에 의해 安定化시킨 火焰

보인다. 그리고 剪斷層을 따라 y方向의 溫度구배가 커짐을 보여주고 있다.

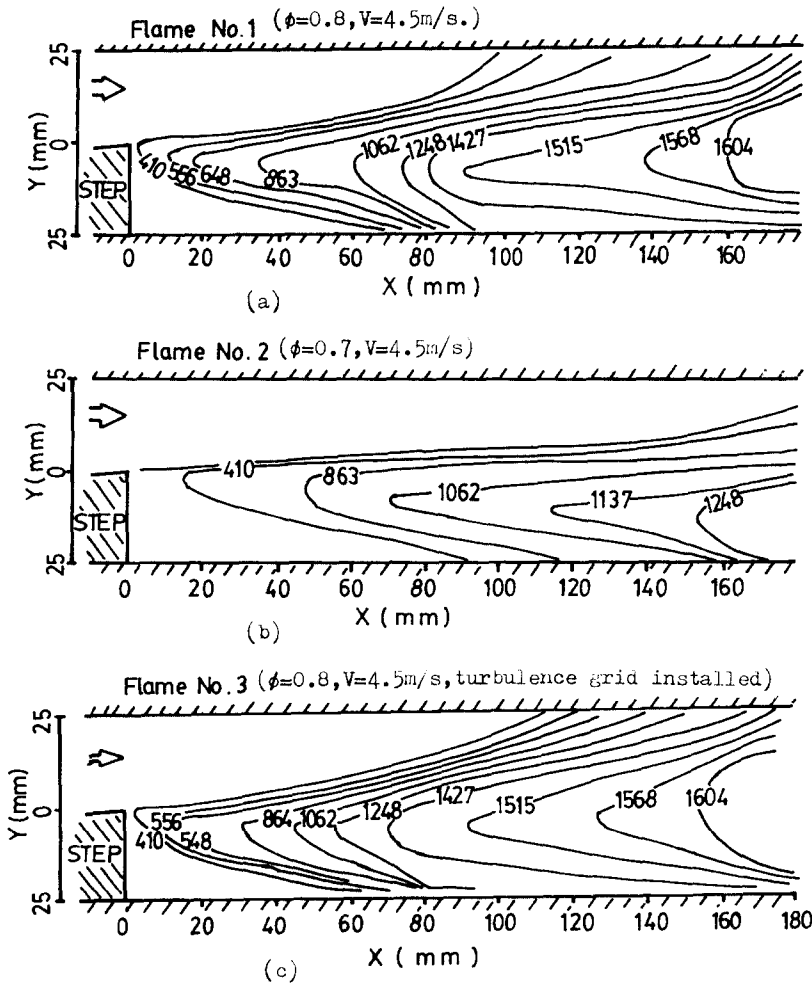
3.2.1. 當量比와 接近亂流強度의 變化에 따른 영향

3.2.2. 變動溫도의 PDF

各 火焰조건에 對한 等溫線圖의 分布를 Fig. 14에 나타냈다. 燃焼器內에서의 溫度分布를 보면 當量比가 큰 경우가 高溫의 等溫線이 step 쪽으로 이동하여 燃焼室內의 溫度가 높아지고 있다. 또한 接近亂流強度를 증가시켜도 역시 上流로 高溫線이 약간씩 移動하고 있는데 이는 亂流強度가 커지면 未燃混合氣와 燃焼가스의 混合이 잘 되고 coherent 構造의 붕괴가 빨라지기 때문으로

Fig. 15는 Flame No. 1에 對한 變動溫도의 確率密度分布(Probability Density Function) 圖이다.

$x=75\text{mm}$ 斷面은 火焰이 coherent eddy에 지배되고 再循環領域이 存在하는 斷面이고  $x=160\text{mm}$ 斷面은 不規則한 3次元 渦에 지배되는 火焰이며 再循環領域이 存在하지 않는 斷面이다.  $x=75\text{mm}$  斷面에서는 3個의 피이크가 보이는데



Unit: °C

Fig. 14. Isothermal lines of flames

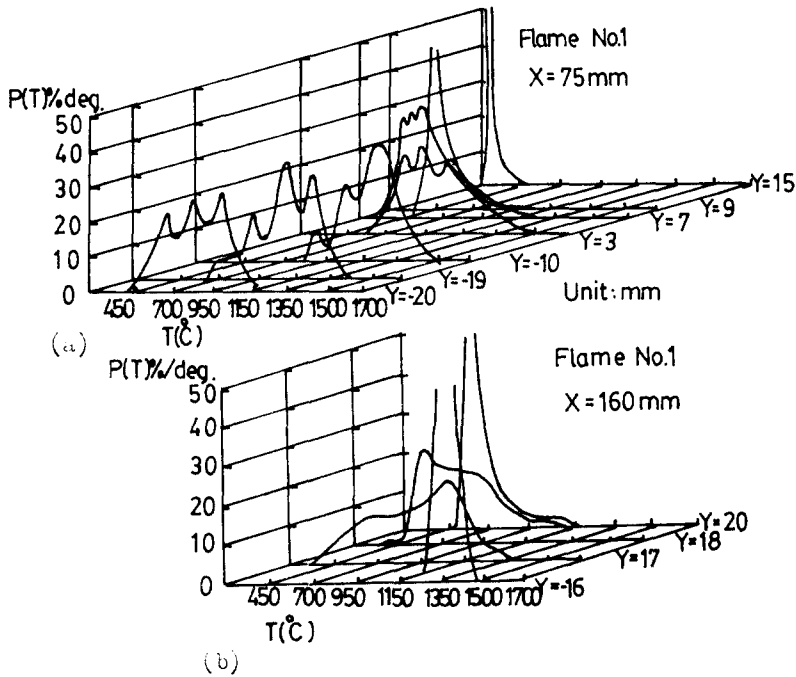


Fig. 15. PDFs of temperature fluctuations for flame No.1

낮은 溫도의 피이크는 未燃混合氣에 對應하고 높은 溫도의 피이크는 火焰溫度 部近에 對應한다. 中間의 피이크는 未燃混合氣와 火焰溫도의 中間값에 對應할 것이다. 즉,  $x = 75 \text{ mm}$  斷面에서는 高溫의 既燃가스와 低溫의 未燃混合氣 外에 反應도가 서로 다른 여러가지 eddy가 存在하는 部分이라고 생각된다. 이는 이미 조사한 바 있는 슈리이렌 사진의 結果를 토대로 Fig. 16과 같은 模型圖를 나타낼 수 있다. Coherent eddy의 휘말림 作用에 의해 未燃混合氣가 휘말려 들어가는 先端部에 강한 스트레치를 받는 部分이 觀察되는데 이 部分에는 反應도가 各各 다른 작은 스케일의 eddy가 存在하는 分散反應領域모델에 가까운 構造를 갖는다고 생각된다. 즉 再循環領域 界面의

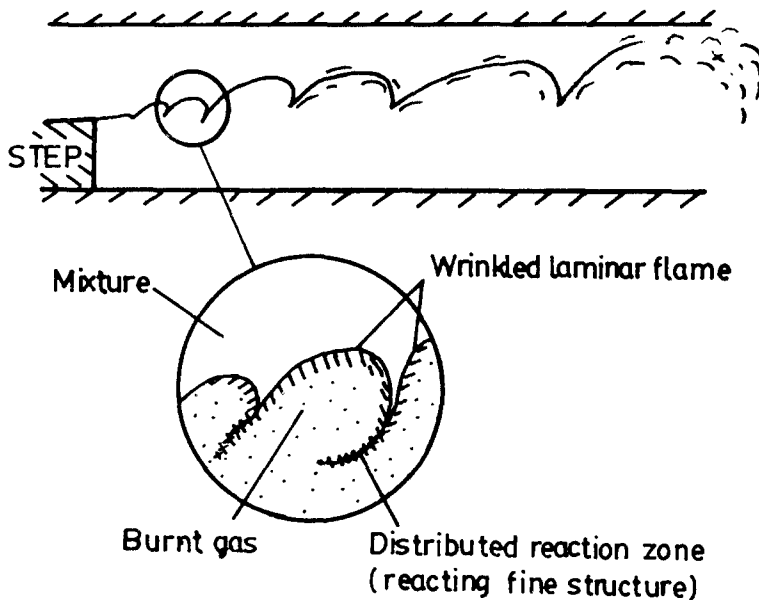


Fig. 16. Image of a flame dominated by coherent vortex (schematic)

剪斷層中에 形成되는 coherent eddy에 支配되는 火焰은 主를狀層流火焰과 一部에 分散反應領域 모델에 가까운 火焰構造를 갖는다. 한편  $x=160$  mm 斷面의 反應領域( $y=17, 18$ mm)에서는 未燃混合氣와 火焰溫度에 對應하는 두개의 피이크가 약간 보이나 中間의 피이크는  $x=75$ mm 斷面에서와 같이 뚜렷하지는 않다. 또 step 上方으로 갈수록 高溫의 피이크는 줄어들고 低溫의 未燃混合氣에 對應하는 값이 높아지고 있다. 즉 反應領域에서는 高溫의 既燃가스塊와 低溫의 未燃混合氣가 混合氣가 混合되는 狀況을 意味한다. 따라서  $x=75$ mm와  $x=160$ mm의 두 斷面을

자세히 觀察해 보면  $x=75$ mm 斷面에서는 3개의 피이크中 中間피이크의 確率이  $x=160$ mm의 中間部分의 確率보다도 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉 循環流를 동반하지 않는  $x=160$ mm 斷面에서의 不規則한 傳播性火焰에서는 대단히 얇은 反應面을 사이에 두고 既燃가스塊와 未燃混合氣가 接하는 소위 主를狀層流火焰 또는 層流火焰片에 가까운 構造를 갖는 것으로 보인다.

3.2.3 變動 이온의 PDF

Fig. 17에는 역시 Flame No. 1의  $x=75$ mm,

160mm 斷面에서의 變動이온전류에 對한 PDF를 나타냈다. 먼저  $x=75$  mm 斷面에서  $y=11$ mm의 위치를 보면 未燃混合氣에 對한 피이크値와 反應中인 가스에 對應하는 피이크値가 약간 보이고  $y=0$ 에서는 未燃混合氣의 確率은 감소하고 反應中인 가스에 對應하는 確率이 증대되고 있다. 이는  $x=160$ mm 斷面에서와는 달리 현저한 3개의 피이크는 아니다.<sup>11)</sup> 이것은 變動溫度 PDF에서도 考察한 바와 같이 反應도가 各各 다른 여러가지 eddy가 存在하기 때문인 것으로 보인다.  $x=160$  mm 斷面의  $y=18, 17$ mm 위치에서는 3개의 피이크를 갖고 있는데 이들은 各各 未燃混合氣( $I=0$ ), 既燃가스( $I=小$ ), 反應中의 가스( $I=大$ )에 對應하는 것으로써 이와같은 分布는 既燃가스塊와 未燃混合氣가 얇은 反應面을 사이에 두고 接하는 主를狀層流火焰에서 나타나는 特性이다. 따라서 下流部의 不規則한 3次元渦에 支配되는 傳播性火焰은 이와같은 構造를 갖는다고 생각된다.  $x=75$ mm 斷面에서 再循環領域의 内部라고 생각되는  $y=19$ mm 위치에서도 이온電流의 PDF에서 燃焼反應에 對應하는 높은 이온電流의

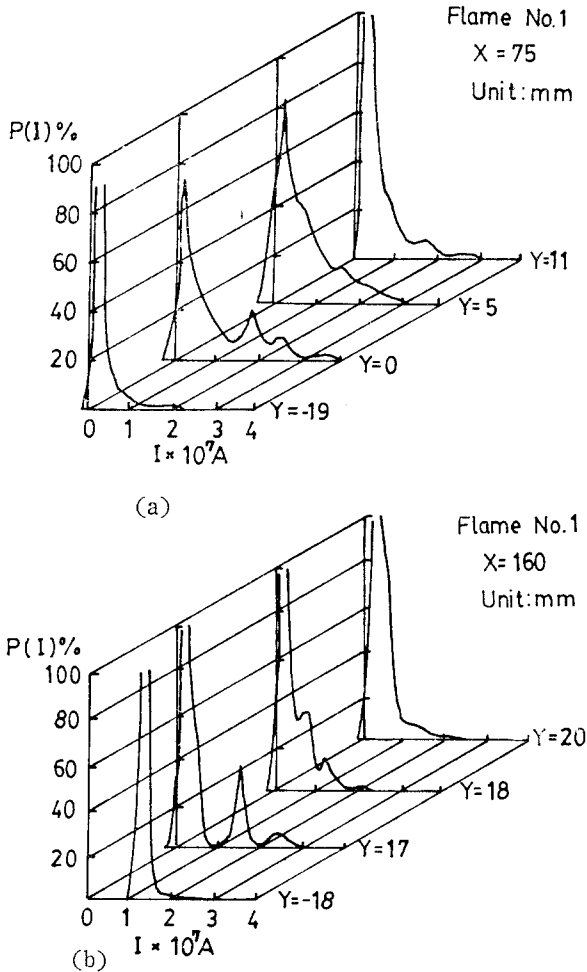


Fig. 17. PDFs of ion current fluctuations for flame No. 1

PDF에서 燃燒反應에 對應하는 높은 이온電流值도 어느정도 存在하고 있는데 同位値部近의 溫度 PDF에서도 豫熱된 未燃混合氣가 存在하는 것을 볼 때 再循環領域内에는 항상 既燃가스만이 循環하고 있는 것은 아니고 때때로 未燃混合氣가 들어와서 燃燒하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

효율적인 燃燒器設計를 위한 基礎研究 目的으로 亂流流動場에서 不規則한 3次元渦에 支配되는 火焰 및 流線形스텔에 의해 安定化시킨 火焰에 대한 微視的 構造와 燃燒反應性을 究明하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 燃燒反應은 時間平均的인 反應領域의 高溫燃燒가스流側에서는 低溫의 未燃混合氣塊에 未燃混合 氣流側에서는 高溫燃燒가스塊에 결부되어 存在하고 그 火焰構造는 얇은 反應面을 경계로 高溫燃燒가스塊와 未燃混合氣塊가 接하는 "Wrinkled laminar flame" 혹은 "Laminar famelets"의 構造이다.

(2) 流速變動의 空間마크로스케일이 燃燒反應에 밀접하게 관련된 이온전류變動 및 溫度變動의 空間마크로스케일 보다 크다. 따라서 燃燒反應은 主로 亂流의 微細構造와 결부되고, 또 溫度는 流速에 比해서 작은 스케일의 亂流와 관련되어 變動하고는 있으나 그 變動은 平均流에 휩쓸려 그대로 運搬된다.

(3) 스텔에 의해 安定化시킨 火焰의 경우에는 平均溫도의 勾配가 最大인 部分에서 變動溫도의 RMS值의 피이크가 存在하고, 또 當量比의 增加( $\phi=0.7$ 에서  $0.8$ 로) 및 接近流의 亂流強度를 세게 하면 코히어런트渦의 붕괴시작이 빨라진다.

이상과 같이 本研究範圍에서의 火焰의 構造는 大部分이 주름狀 層流火焰 혹은 層流火焰片에 가까운 構造이나 강한 剪斷을 받는 火焰의 一部에 分散反應領域構造가 存在하는 可能性이 示唆되었다. 本研究에서 다루지 못한 이 分散反應領域火焰을 넓은 空間的 領域에 正常的으로 形成시키는 매우 어려우나 本研究를 더욱 發展시키기 위하여 이의 實現에 努力을 계속할 생각이다

#### 後 記

本研究는 1985年度 韓國學術振興 財團의 研究 費 支援에 의해서 수행된 것이며, 이에 깊은 感謝의 뜻을 表합니다.

#### 參 考 文 獻

- 1) 吉田 亮, "亂流豫混合火炎", 日本航空宇宙學會誌, Vol. 29, No. 327, p.182, (1981)
- 2) 公開討論會, 「亂流燃燒」, 日本燃燒シンポジウム(第17回 各古屋)(1979)
- 3) G. Damköhler, "The Effect of Turbulence on the Flame Velocity in Gas Mixtures" NACA TM No. 1112, (1947)
- 4) K. Yamazaki and H. Tsuji, "An Experimental Investigation on the Stability of Turbulent Burner Flames" Proc. 8th symp. (Int.) on Combustion, p. 543, (1962)
- 5) M. Summerfield, S. H. Reiter, V. Kebely and R. W. Mascolo. "The Physical Structure of Turbulent Flames" Jet Propulsion, Vol. 24, p. 254, (1954)
- 6) M. Summerfield, S. H. Reiter, V. Kebely and R. W. Mascolo, "The Structure and Propagation Mechanism of Turbulent Flames in High Speed Flow" Jet Propulsion, vol. 25, No. 8, p. 377(1955)
- 7) A. R. Ganji and R. F. Sawyer, "An Experimental Study of the Flow Field in a Two Dimensional Premixed Turbulent Flames" 17th Aerospace Meeting, New Orleans, pp. 15~17, (1979)
- 8) 香月正司, 水谷幸夫, 崔炳輪, 柴田悅雄, 秋友克文 "亂流豫混合火炎의 構造(第1報, 코히어런트우자에 支配される火炎)", 日本機械學會論文集(B編), Vol. 50, No. 452, pp. 1077~1087, (1984)
- 9) 崔炳輪, 香月正司, 水谷幸夫, "圓柱保焰器에 의해 安定化된 亂流豫混合火炎의 構造" 大韓機械學會論文集 Vol. 9, No. 4, pp. 497~508, (1985)