

<論 文>

空氣밸브型 脈動燃燒시스템의 燃燒特性에 관한 研究

林 光 烈* · 吳 相 憲** · 崔 炳 輪**

(1987年 12月 5日 接受)

A Study on the Combustion Characteristics in an Aero-Valved Pulsating Combustion System

Kwang Ryoul Lim, Sang Heun Oh and Byoung Ryun Choi

Key Words : Pressure Fluctuation(壓力變動), Temperature Fluctuation(溫度變動), Ion Current(이온電流), Reignition(再着火), Explosive Combustion(爆發燃燒)

Abstract

Experimental study was carried out to investigate the combustion characteristics of the aero-valved pulsating combustor with maximum operating capacity of 56kW. The pressure, the ion current, and the temperature fluctuations were simultaneously measured and statistically analyzed to identify the combustion process, the reignition and the mixing process of the reactants. It was found that the pulse combustion process was intermittent and the reignition of the reactants was caused by a direct contact and rapid mixing with the previous hot residuals. The analysis of the measured data indicated that the combustion process consisted of three stages in the combustion chamber ; the preheating of the reactants in the vicinity of the air inlet pipe, the explosive combustion in the central region and the afterburning in the vicinity of the tailpipe. While the inflow of the fresh air occurred during the negative period of the pressure in the mechanical valved system, it occurred during the rising period of the pressure in the aero-valved system.

1. 序 論

脈動燃燒는 週期的으로 反復되는 一種의 爆發燃燒에 의해 생기는 燃燒室內의 壓力脈動에 의해서 自發的으로 燃燒用 空氣의 流入 및 燃燒가스의 排出가 강하게 이루어지며, 從來의 連續式 燃燒方式

에 비해 高負荷燃燒

및 높은 熱傳達特性, 그리고 低 NO_x排出 등의 長點들이 認識되면서 에너지의 效率의 利用 및 排氣汚染低減을 目的으로 最近에 이 分野에 대한 많은 관심과 함께 研究가 활발히 進行되고 있다. 이런 추세에 발맞춰 Putnam 등⁽¹⁾은 脈動燃燒에 관한 지금까지의 研究結果와 앞으로의 研究展望에 대해 포괄적으로 要約 整理를 하였다.

그러나, 주로 空氣流入部分에 밸브가 있는 機械

* 正會員, 釜山大學校 大學院

** 正會員, 釜山大學校 工科大學 機械工學科

밸브형을 中心으로 研究⁽²⁻⁹⁾ 및 實用化가 이루어져 왔으며, 空氣流入部에 밸브가 없는 空氣밸브型에 관해서는 應用的 側面的 研究⁽¹⁰⁻¹⁴⁾가 一部 있을뿐이며, 最近에 Bogden⁽¹⁵⁾의 모델링을 위한 燃燒特性에 관한 報告가 있으나, 현재까지 空氣밸브型 脈動燃燒시스템의 燃燒機構를 근본적으로 理解하기 위한 基礎的 研究는 거의 없는 實情이다.

그래서, 最近 著者들은 空氣밸브型 脈動燃燒시스템의 基礎的 研究의 일환으로 全般的 特性에 관한 研究⁽¹⁶⁾ 및 幾何學的 形狀變化에 따른 脈動燃燒의 安定範圍 및 動的 舉動에 관한 研究⁽¹⁷⁾를 수행했다.

本 研究에서는 前報⁽¹⁷⁾의 研究를 통해 가장 性能이 우수하다고 評價된 形狀의 燃燒시스템을 선택해서, 燃燒室의 壓力變動과 이온電流變動의 同時測定, 壓力變動과 溫度變動의 同時測定結果를 信號分析器에 의해 統計處理함으로써 아직까지 理解가 대단히 부족한 再着火 및 燃燒메카니즘, 그리고 空氣流動特性에 관한 物理的 現象을 糾明하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

Fig. 1은 基礎實驗用 空氣밸브型 脈動燃燒시스템의 構造를 나타내며 상세한 構造說明은 前報⁽¹⁷⁾에 記述되어 있다. 燃料는 一般家庭用 프로판가스를 使用하였다.

本 實驗에서 선택한 燃燒시스템의 幾何學的 形狀條件은 前報⁽¹⁷⁾에서의 實驗을 통해 性能이 가장 우수하다고 評價되었던 C-形이며, 各部 值數를 Table 1에 나타내었다.

實驗方法은, 點火裝置 및 送風機를 作動시킨 後, 燃料를 噴射노즐을 통해 燃燒室內로 供給하면 爆發燃燒와 함께 壓力脈動의 發生이 始作되고, 20~30

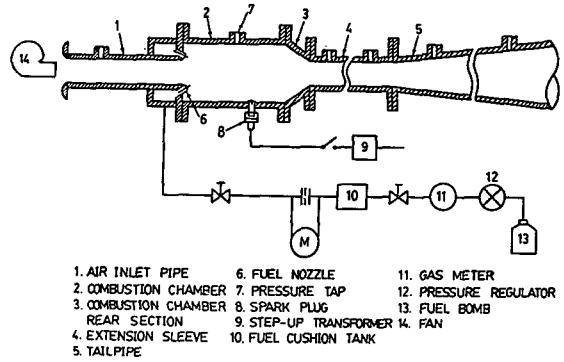


Fig. 1 Experimental apparatus

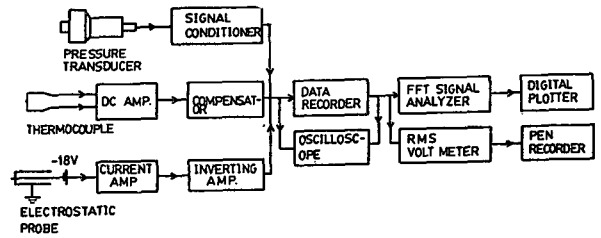


Fig. 2 Measuring systems of fluctuating pressure, temperature and ion current

本 測定은 燃燒室이 충분히 加熱되도록 始動後 數分이 경과되고 나서 行했다.

초 後 오실로스코우프를 통해 正常的인 發振을 確認한 後 點火裝置 및 送風機의 驅動을 정지시킨다.

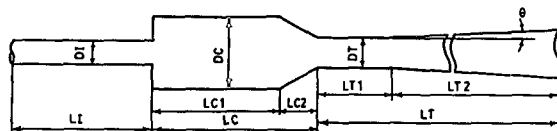
Fig. 2에 壓力, 溫度, 이온電流變動을 測定하기 위한 블록線圖를 나타낸다.

壓力變動測定은, 燃燒室 中央壁面에 設置한 스트레인게이지形 壓力센서에서 受信된 信號를 시그널 콘디셔너로 增幅시켜 데이터 리코오더에 收錄시킨 後, FFT信號分析器에 의해 統計處理를 行했다.

溫度變動測定用 프로브는 素線徑 50 μ m의 Pt/Pt-Rh13%의 熱電對가 素線과 同質의 直徑 0.5mm

Table 1 Experimental size of an aero-valved pulsating combustor (Unit: mm)

Combust. Chamb.				Air inlet pipe		Tailpipe					Fuel nozzle		
DC	LC1	LC2	LC	DI	LI	DT	LT1	LT2	LT	θ	Number	Diameter	Injection angle
72.3	127	38	165	25	140	30	295	813	1108	1.3°	4	1.2	30°



의 支柱에 各各 熔接되어 있으며, 直徑 3mm의 자기관(2holes)으로 構成된다. 熱電對의 熱起電力은 저주파 여과기(low pass filter)를 통해 1KHz 이상의 雜音을 제거시킨 後 DC앰프에 의해 增幅시켰으며, 補償器에서 變換되어 데이터 리코오더에 收錄된 後, FFT信號分析器에 의해 統計處理를 行했다.

熱電對의 時定數는 별도로 測定하지 않고, 空氣流動이 週期的으로 確實히 이루어지는 空氣流入管에 가까운 燃燒室의 中心軸上에 熱電對를 設置해서 補償器를 調節하면서 測定된 變動溫度의 確率密度分布를 구함으로써 실제의 溫度變動에 가깝게 되도록 補償器의 時定數를 定했다. 이러한 時定數 補償方法이 正確하지는 않지만 溫度變動에 의한 燃燒特性을 現象적으로 觀察하는 데는 타당하다고 생각하며, 단순한 平均溫度測定에는 素線徑 0.1mm의 Pt/Rh13% 熱電對를 使用하였다.

이온電流變動測定用 프로브는 直徑 0.1mm인 Pt-Rh13%線과 直徑3mm인 자기관으로 構成되며, 感應部는 자기관으로부터 0.5mm 돌출시켜 -18V의 電壓에 의해 양이온을 檢出하고, 이 檢出된 이온電流는 微少電流增幅器와 反轉增幅器에 의해 增幅되어 데이터 리코오더에 收錄된 後, FFT信號分析器에 의해 統計處理를 行하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 平均溫度分析

Fig. 3은 燃燒室內 半斷面의 平均溫度分布를 나타낸다. 이 等溫線圖는 平均溫度를 軸方向으로 11個의 位置, 半徑方向으로 2.5mm 간격으로 14個의

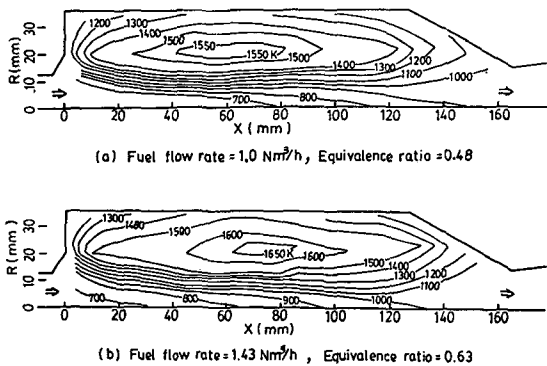


Fig. 3 Mean temperature distribution

位置(燃燒後 尾室에서는 10個의 位置), 總 150個의 位置에 대해 測定해서 作成하였다. 여기서 燃燒室 入口로부터 排氣管을 향한 軸方向의 距離를 X, 燃燒室中心으로부터 半徑方向의 距離를 R로 表示한다.

Fig. 3(a)는 供給燃料量이 1.0Nm³/h일때, Fig. 3(b)는 供給燃料量이 1.43Nm³/h일때의 平均溫度分布이다. Fig. 3(a), (b)를 比較해보면, (b)의 경우가 (a)의 경우보다 對應되는 位置에서의 溫度가 全體적으로 조금 높고, 最高溫度領域이 排氣管 方向으로 약간 移動되었다.

(a), (b)에 관계없이 注目되는 點은 最高溫度領域이 X=50~90mm, R=20~25mm領域(즉 半斷面基準으로 볼때 거의 燃燒室의 中心領域)에서 形成되며, 이를 中心으로 軸方向으로는 완만한 溫度勾配가 形成되고 있는데, 이는 燃燒室의 中心을 통해 다량의 空氣가 流入되기 때문이다. 또한 이 高溫領域이 反應物의 着火 및 燃燒에 重要한 역할을 하고 있다고 생각되며, 後述하는 變動溫度特性에서 자세히 考察한다.

3.2 이온電流變動特性

Fig. 4는 Fig. 3(a)의 條件을 基準으로 測定한 燃

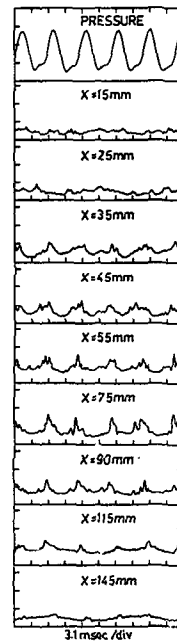


Fig. 4 Fluctuating characteristics of pressure and ion current along the center line

燒室內의 壓力變動과 燃燒室의 中心軸($R=0\text{mm}$) 上的 軸方向의 位置에 따른 이온 電流變動을 同時測定한 結果이다. 여기서, 첫번째 그림은 壓力變動, 두번째 以後의 그림은 軸方向의 位置에 따른 이온電流變動을 나타낸다.

壓力派形의 1사이클의 內容을 보면, 壓力變動의 平均週期는 6.0msec , 壓力의 最小值로부터 最大值까지 增加하는 時間은 2.3msec , 그리고 壓力의 最小值에서 1.8msec 경과후 급격한 壓力上昇이 發生하고 있다.

이온電流變動을 보면, $X=15\text{mm}$ 位置에서는 이온電流의 피크值가 檢出되고 있지 않으며, $X=25\text{mm}$ 位置에서는 微小한 이온電流의 피크值가 每週期마다 檢出되는 것은 아니지만 간헐적으로 檢出되고 있다. $X=35\text{mm}$ 位值부터는 週期的으로 이온이 檢出되고 있으며, 下流로 갈수록 $X=75\text{mm}$ 位置까지 이온電流의 피크值가 增加하다가, 다시 減少하여 $X=145\text{mm}$ 位置에서는 이온電流가 대단히 微小하게 檢出되고 있다. 또한 全體的으로 壓力이 上昇하는 時間에만 이온電流의 피크值가 현저히 나타나고 있다.

Fig. 5(a), (b), (c)는 各各 壓力變動과 代表的으로 선택된 3斷面, 즉 $X=75\text{mm}$ 斷面(燃燒室의 中央部), $X=35\text{mm}$ 斷面(燃燒室의 上流部), $X=$

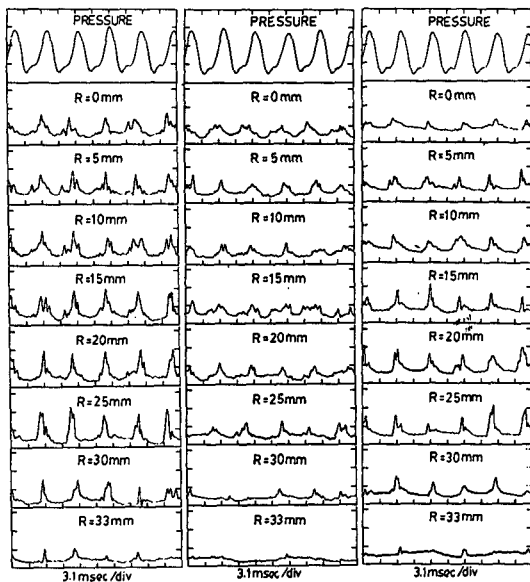
115mm 斷面(燃燒室의 下流部)에서 半徑方向의 位置에 따른 이온電流變動을 同時測定한 結果이다.

Fig. 5(a)를 보면, 燃燒室의 中心($R=0\text{mm}$)에서 表面方向으로 갈수록 이온電流變動이 더 커지다가 $R=15\sim 25\text{mm}$ 에서 最大로 되고, 다시 減少하는 傾向을 보여준다. 그리고 全體的으로 이온電流는 거의 週期的으로 壓力이 最小值에서 最大值로 上昇하는 期間에만 檢出되고 있으며, 位置에 따라 이온檢出期間은 다르나, 이온檢出時期는 큰 差異가 없는 現象을 보여준다.

Fig. 5(b)를 보면, Fig. 5(a)보다 全體的으로 이온電流의 피크值가 작게 나타나고 있으며, 檢出時期는 Fig. 5(a)와 비슷하다. 또한 $R=33\text{mm}$ (表面 근방)에서는 이온電流의 피크值가 거의 나타나고 있지 않다.

Fig. 5(c)를 보면, 全體的인 傾向은 Fig. 5(a)와 비슷하며, 단지 이온電流의 피크值가 Fig. 5(a)보다 작고, $R=33\text{mm}$ 에서는 微小한 이온 電流의 피크가 간헐적으로만 나타나고 있다. 이처럼, Fig. 4와 Fig. 5 및 그 以外의 燃燒室 全體的 位置에서 이온電流와 壓力變動을 同時測定한 結果, 이온電流가 계속해서 높은값이 檢出되는 것은 아니고, 着火後의 燃燒過程에 對應되는 最小壓力에서 最大壓力까지의 壓力上昇時期에만 檢出되고, 最大壓力에서 最小壓力까지의 壓力減少時期에는 현저한 값이 檢出되지 않는 特徵이 얻어졌다.

이들의 結果는 燃燒室內에 燃燒反應이 끊임없이 계속되는 것은 아니고, 膨脹排氣過程에서는 燃燒反應이 일어나고 있지 않음을 意味하며, 따라서 反應物의 着火가 燃燒器內의 殘存火炎에 의해 達成되고 있지 않음을 明白히 알 수 있다. 또한 檢出된 이온



(a) $X=75\text{mm}$ (b) $X=35\text{mm}$ (c) $X=115\text{mm}$

Fig 5 Fluctuating Characteristics of pressure and ion current along radial position

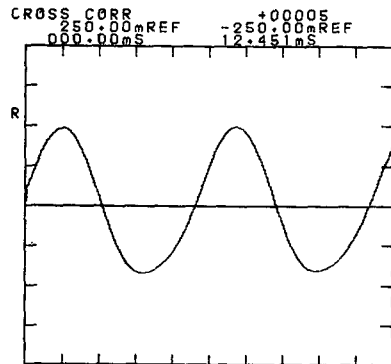


Fig. 6 Cross correlation of fluctuating ion current and pressure

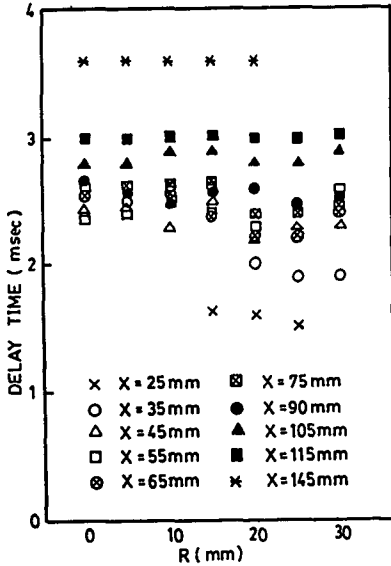


Fig. 7 Delay time distribution of ion current peak from negative pressure peak time

電流波形이 複雜한 펄스狀波形으로 構成되고 있는 사실로부터 燃燒過程에 있어서 火炎의 構造가 대단히 複雜함을 豫測할 수 있다.

Fig. 6은 이온電流變動과 壓力變動을 同時測定한 結果로부터 구한 相互相關係數의 일례를 나타낸다. 여기서 이온電流의 檢出位置는 이온電流變動이 가장 크게 나타나는 位置인 $X=75\text{mm}$, $R=20\text{mm}$ 이다. 이 그림에서 壓力의 피크가 이온의 피크보다 1.3msec 遲延後 나타나고 있는데, 이로부터 最小壓力를 基準으로 한 이온電流의 피크檢出遲延時間은 $3.7\text{msec}-1.3\text{msec}=2.4\text{msec}$ 가 된다. 또한 相互相關係數가 週期的으로 거의 一定한 값을 갖는 사실로부터 이온電流와 壓力變動의 相互相關性은 時間에 따라 一定함을 알 수 있다.

이런 方法으로 計算한 이온電流의 피크檢出遲延時間을 燃燒室의 位置別로 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림을 보면, $X=25\text{mm}$ 斷面에서는 遲延時間이 1.6msec 정도로서 壓力이 急上昇하기 직전의 時期에 해당되며, 이온電流의 檢出도 대단히 微小한 사실로부터, 爆發燃燒前의 過濃混合氣의 前炎反應이 일어나는 것으로 보이며, $X=45\sim 115\text{mm}$ 사이의 斷面에서는 遲延時間이 2.0~3.0msec 정도로 反應強度와 時間의 差異는 다소 있으나, 거의 全領域에서 同時多發的으로 강한 爆發燃燒가 일어나고 있으며, $X=145\text{mm}$ 斷面에서는 遲延時間이 3.6msec

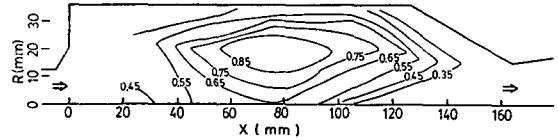


Fig. 8 Non-dimensional RMS value ($i'/i'max$) distribution of fluctuating ion current

程度이고 이온電流도 微小하게 檢出되는 사실로부터 壓力上昇이 거의 끝나는 最大壓力時間 직전에 燃燒가스中에 殘存하는 未燃混合氣의 약한 後燃燒(after-burning)가 일어난다고 판단된다. 즉 燃燒過程을 境界가 明白히 구분되지는 않지만 3단계로 구분할 수 있다고 생각한다.

Fig. 8은 이온電流變動의 RMS值的 分布를 無次元으로 나타낸 그림이다. 이 그림을 보면, 半斷面基準으로 燃燒室의 中央領域($X=60\sim 90\text{mm}$, $R=15\sim 25\text{mm}$)에서 가장 큰 이온電流變動値를 갖고 있고, 이를 中心으로 멀어질수록 變動値가 작아지고 있다. 결국 燃燒室의 매우 廣範圍한 領域에 걸쳐 燃燒反應이 일어나고 있지만, 그 反應強度는 位置에 따라 큰 差異를 보이고 있다. 이는 짧은 時間內에 廣範圍한 領域에서 可燃混合氣가 形成되지만 그 混合氣의 狀態는 位置에 따라 다르고 아주 複雜한 樣相을 갖고 있기 때문이라고 생각된다.

3.3 溫度變動特性

Fig. 9는 Fig. 3(a)의 條件을 基準으로 測定한 燃燒室內의 壓力變動과 燃燒室의 中心軸上($R=0\text{mm}$)의 軸方向의 位置에 따른 溫度變動을 同時測定한 結果이다. 첫번째 그림은 壓力變動, 두번째 그림부터는 軸方向의 位置에 따른 溫度變動을 나타낸다.

$X=35\text{mm}$ 에서의 溫度變動을 보면, 最小壓力에서 조금 遲延된 時間에서부터 最大壓力으로 上昇하는 期間에 低溫으로 되고, 壓力이 減少하는 期間에 高溫으로 되고 있다. 즉 最小壓力근방에서 空氣의 流入이 始作되고, 이로 인해 壓力은 變曲點까지 완만하게 增加하다가 계속 流入되는 空氣와 燃料의 慣性力 및 加熱에 의한 膨脹, 그리고 未燃混合氣의 同時多發的인 爆發燃燒에 의해 燃燒室의 壓力은 最大値까지 急上昇하고, 壓力이 상당히 上昇될때까지도 低溫이 계속 維持되는 사실로부터 空氣流入管에 가까운 位置에서는 空氣의 流入이 계속됨을 알 수 있다. 또한 最大値까지 上昇된 壓力에 의해 空氣流

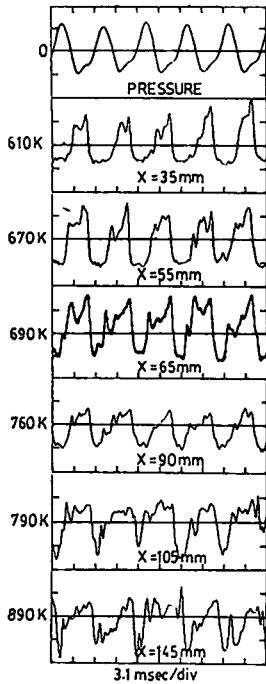


Fig. 9 Fluctuating Characteristics of pressure and temperature along the center line, pressure vertical scale: 16.8KPa/div, temperature vertical scale: 200°C/div.

入管 및 排氣管을 향하여 燃燒가스가 排出되면서 壓力은 最小值까지 급격히 減少하는 過程이 反復해서 週期的으로 일어나는 것으로 볼 수 있다. 燃燒가스의 排出過程에서, 空氣流入管쪽으로는 流入되던 空氣에 의해 강한 抵抗을 받게 되고, 반면 排氣管쪽으로는 比較的 抵抗을 작게 받으며 燃燒가스의 排出이 활발하게 이루어진다. 즉 空氣流入管自體가 空氣力學的인 燃燒가스逆止밸브의 역할을 效果的으로 수행하고 있음을 알 수 있다.

軸方向의 位置에 따른 溫度變動波形을 比較해보면, X가 增加함에 따라 高溫에서 低溫으로 급격하게 溫度變化가 일어나는 時期가 약간씩 遲延되는 遲延時間을 FFT信號分析器에 의한 信號分析을 통해 決定할 수 있으며, 이 結果로부터 位置別 空氣流入時間差를 알 수 있다. 또한 X가 增加할수록 低溫에서 高溫으로 上昇하는 時期가 점점 빨라지고 있는데, 이는 空氣가 流入되는 동안 爆發燃燒가 일어나므로 排氣管쪽으로 갈수록 流入空氣의 慣性力이 減少되면서 爆發壓力의 영향이 크게 作用하기 때문이다. 따라서 排氣管쪽으로 갈수록 空氣流入期

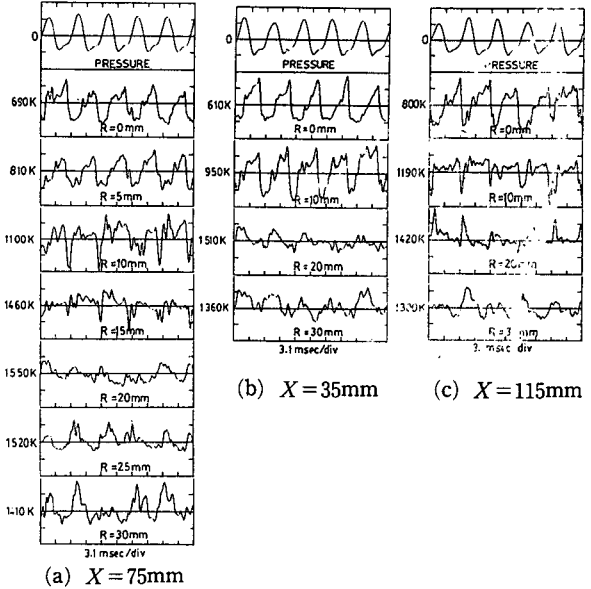


Fig. 10 Fluctuating Characteristics of pressure and temperature along radial position, pressure vertical scale: 16.8KPa/div, temperature vertical scale: 200°C/div

間은 점점 짧아진다. X=145mm에서의 溫度變動特性이 매우 複雜한데, 이는 排氣管으로부터의 燃燒가스逆流도 強하게 作用하기 때문이며, X=105mm까지 燃燒가스逆流의 영향이 미치고 있는 것으로 보인다.

Fig. 10(a), (b), (c)는 各各 壓力變動과 X=75mm斷面, X=35mm 斷面, X=115mm斷面에서의 半徑方向의 位置에 따른 溫度變動을 同時測定한 結果이다.

Fig. 10(a)를 보면, R=0와 5mm位置에서의 溫度變動特性은 거의 비슷하며, R이 增加함에 따라 低溫期間은 점점 減少하다가 R=20mm位置부터는 低溫期間은 거의 나타나고 있지 않다. 즉 R=15mm부근까지만 空氣가 流入되며, 流入期間도 R=15mm에 가까울수록 급격히 減少하고 있다. 軸方向(Fig. 9)보다 半徑方向에 따른 低溫期間의 급격한 減少는 空氣의 流動方向이 軸方向이므로, 半徑方向으로는 亂流擴散의 영향이 주로 作用하는 것으로 볼 수 있다.

R=20mm位置에서는 平均溫度는 가장 높고 溫度變動은 가장 작으며, 溫度上昇時期와 壓力上昇時期가 一致하고, 이온電流變動이 가장 크게 檢出되는 사실로 미루어 볼때 爆發燃燒의 中心位置라고

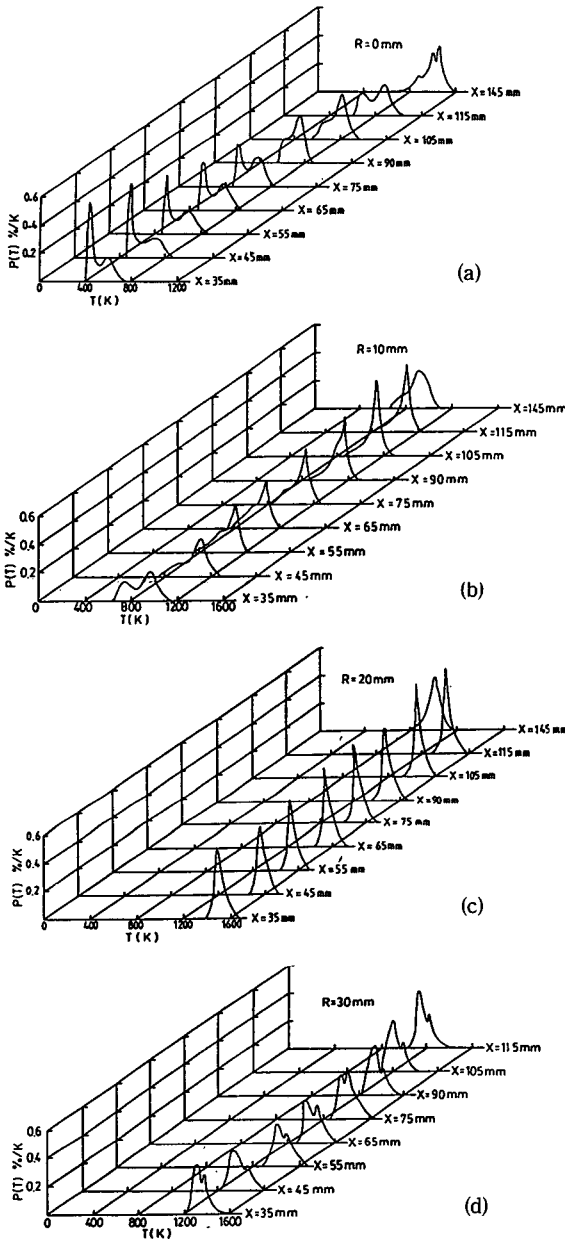


Fig. 11 PDF of temperature fluctuations

생각된다. R=20mm부터 燃焼室의 壁面으로 감에 따라 溫度變動은 增加하고 있지만 급격한 溫度低下가 없는 사실로부터 찬 空氣의 流入은 없으며, 高溫의 燃焼가스가 계속 殘存하고 있다고 생각한다.

Fig. 10(b)와 (c)를 보면 半徑方向에 따른 溫度變動特性이 變化되는 傾向은 Fig. 10(a)에서와 정성적으로 거의 비슷한 結果를 보이고 있다.

Fig. 11(a), (b), (c), (d)는 各各 R=0mm, 10mm, 20mm, 30mm에서 軸方向位置에 따른 溫度變動의 確率密度分布를 나타낸다.

Fig. 11(a)에서 X=35mm에서의 確率密度分布를 보면, 低溫測의 큰 피크와 약간 高溫測의 작은 피크가 나타나는 쌍봉형의 特徵을 갖고 있는데, 低溫測의 피크는 燃料과 空氣, 또는 燃料과 空氣의 混合氣(以下 空氣로 통칭한다)가 通過하는 確率을, 高溫測의 피크는 燃焼가스가 通過하는 確率을 나타낸다고 할 수 있다. 즉 空氣가 通過하는 確率이 燃焼가스가 通過하는 確率보다 훨씬 크며, X값이 커짐에 따라 低溫의 피크는 작아지고, 高溫의 피크는 커지다가 X=90mm에서부터는 高溫의 피크가 더 크고, X=145mm에서는 3개의 피크가 나타나고 있다. 즉 X=90mm에서부터 燃焼가스가 通過하는 確率은 空氣보다 더 커지고 있으며, X=115mm에서는 排氣管으로부터의 燃焼가스의 逆流이 作用하므로 예리한 피크가 둔화된 것으로 보이며, X=145mm에서는 空氣에 對應되는 低溫의 작은 피크, 燃焼가스의 逆流에 對應되는 中間溫度의 피크, 燃焼가스에 對應되는 高溫의 피크가 나타나고 있다. 또한 X값이 커짐에 따라 低溫과 高溫의 피크에 對應되는 溫度가 점차 上昇하고 있는데, 이는 찬 空氣는 점점 加熱되고, 燃焼가스의 溫度가 下降하는 程度는 점점 작아지는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 11(b)를 보면, X값이 커짐에 따라 低溫의 피크가 점점 작아지다가 X=105mm에서는 완전히 消滅하여 高溫의 단일피크만이 나타나고 있다. 결국 이 斷面에서는 中心軸상에 비해 空氣가 通過하는 確率은 全體적으로 작으며, X값이 커질수록 空氣가 通過하는 確率은 減少하고 있다.

Fig. 11(c)를 보면, 位置에 관계없이 高溫의 단일피크가 나타나고 있는데, 따라서 空氣의 通過는 거의 없으며, 이온電流檢出特性을 함께 고려해보면 X=35mm, 145mm를 제외한 位置에서, 이 R=20mm 斷面이 주된 爆發燃焼領域으로 생각할 수 있다.

Fig. 11(d)를 보면, 高溫領域에서 2개의 피크가 나타나고 있는데, 高溫의 피크는 燃焼가 일어나는 時期의 高溫의 燃焼가스에 對應되고, 약간 低溫의 피크는 燃焼室에 殘存하는 燃焼가스에 對應되는 것으로 사료된다. X=75mm位置에서 高溫의 피크가 低溫의 피크보다 더 크며, 燃焼反應이 가장 강하게 일어나는 것으로 보이며, 이런 사실을 이온電流檢

出에 의해 확인할 수 있다.

Fig. 12(a), (b), (c)는 各各 $X=35\text{mm}$, 75mm , 115mm 斷面에서의 半徑方向에 따른 溫度變動의 確率密度分布를 나타낸다.

Fig. 12(a)를 보면, $R=20\text{mm}$ 에서의 溫度分布가 가장 높고, $R=0\sim 10\text{mm}$ 사이에는 2個의 피크, $R=15\sim 25\text{mm}$ 사이에는 단일피크, $R=30\text{mm}$ 에서 다시 2個의 피크가 나타나고 있다. 또한 R 이 커짐에 따라 低溫의 피크가 減少하다가 $R=15\text{mm}$ 에서는 완전히 消滅되었다. 즉 燃燒室의 壁面으로 갈수록 空氣가 通過하는 時間比率이 점점 減少하다가 $R=15\text{mm}$ 부터는 거의 空氣의 通過가 없어진다고 말할 수 있다.

Fig. 12(b)를 보면, Fig. 12(a)와 거의 비슷한 變化傾向을 보여주고 있으며, Fig. 12(a)보다 各各 對應되는 位置에서 空氣가 流入되는 時間比率이 더 작을뿐만 아니라, 高溫의 溫度分布特性을 보여주고 있다. 또한 $R=20\text{mm}$ 에서 最高의 溫度分布가 나타나고 있는데, Fig. 8의 이온 電流變動의 分布로부터도 알 수 있듯이, 이 位置가 反應強度가 가장

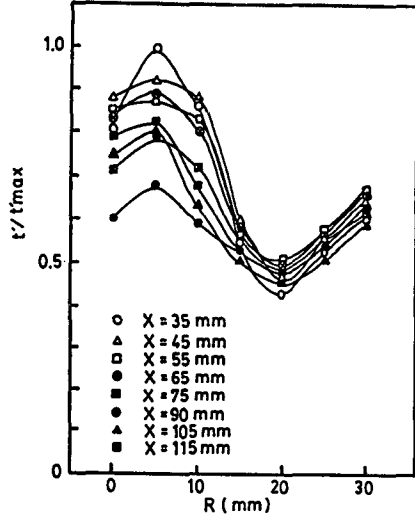


Fig. 13 Non-dimensional RMS values of fluctuating temperature

강한 爆發中心領域으로 생각된다.

Fig. 12(c)를 보면, $R=10\text{mm}$ 에서부터 低溫의 피크가 보이지 않으며, Fig. 12(b)의 $R=10\text{mm}$ 에

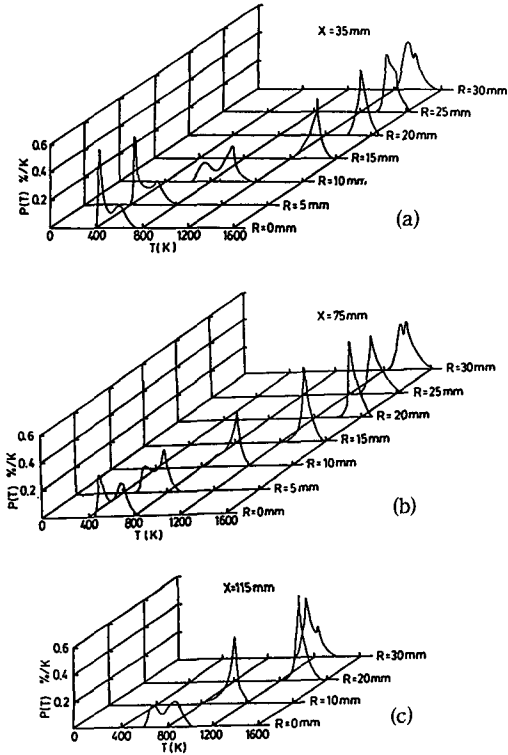


Fig. 12 PDF of temperature fluctuations

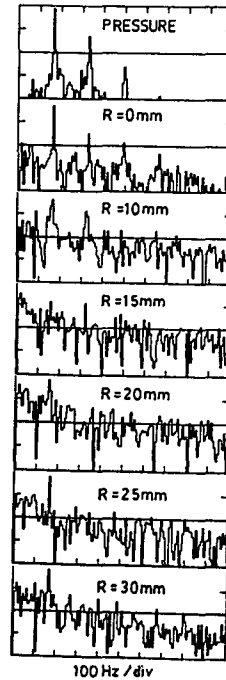


Fig. 14 Frequency spectra of fluctuating pressure and temperature along radial position for $X=75\text{mm}$.

서 보다 流入空氣의 時間比率이 작음을 알 수 있다.

Fig. 13은 燃燒室의 空間的 位置에 따른 變動溫도의 無次元 RMS值를 나타낸다. 이 그림을 보면, 軸方向位置(X)에 관계없이 $R=5\text{mm}$ 斷面에서 變動이 가장 크고, $R=20\text{mm}$ 斷面에서 變動이 가장 작은 溫度變動特性을 보여준다.

Fig. 14는 $X=75\text{mm}$ 斷面에서 半徑方向位置에 따른 溫度變動과 壓力變動의 周波數分析結果를 對比시킨 그림이다. $R=0\text{mm}$ 에서는 壓力變動의 周波數特性和 거의 같게 基本作動周波數에서 제 1 피크가 나타나고, 제 2, 3, 4의 調和周波數에서 점점 減少되는 피크가 나타나는 特徵을 보여준다. 또한 全體적으로 基本周波數에서 가장 큰 피크가 나타나고, 調和周波數特성은 位置에 따라 다르게 나타나고 있다.

4. 結 論

著者が 研究遂行해 온 結果, 性能이 가장 좋게 評價된 形狀의 空氣밸브型 脈動燃燒시스템을 선택해서 壓力變動과 이온電流變動의 同時測定, 壓力變動과 溫度變動의 同時測定結果를 信號分析器에 의해 統計處理한 結果, 着火 및 燃燒過程, 그리고 空氣流動過程에 대한 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 燃燒室內에서 끊임없이 燃燒反應이 계속되지는 않기 때문에, 流入混合氣의 着火는 燃燒室內에 殘存하는 高溫의 燃燒가스와의 接觸 및 混合에 의한 着火의 形態를 갖는다.

(2) 燃燒過程은, 空氣流入管에 가까운 位置에서 爆發燃燒 以前에 일어나는 低溫의 前炎反應이 일어나고, 그 후 燃燒室의 넓은 領域에 걸쳐 同時多發의 所以 일어나는 爆發燃燒단계, 그 후 排氣管에 가까운 位置에서 일어나는 後燃燒단계인 3단계의 燃燒過程으로 構成되는 特徵을 갖고 있다.

(3) 爆發燃燒의 中心領域은 $X=60\sim 90\text{mm}$, $R=15\sim 25\text{mm}$ 부근이며, $X=45\sim 125\text{mm}$, $R=10\sim 25\text{mm}$ 의 넓은 領域에 걸쳐 강한 爆發燃燒가 일어난다.

(4) 脈動燃燒의 1사이클에 있어서, 燃燒室로의 空氣流入時期는 機械的 밸브型에서는 壓力變動의 負壓期間에만 이루어지는 반면, 本 空氣밸브型에서는 最小壓力에서부터 壓力가 상당히 上昇하는 期間

까지 이루어지는 매우 다른 空氣流動特性을 갖고 있다.

參 考 文 獻

- (1) A. A. Putnam, F. E. Belles, J. A. C. Kentfield, 1986, "Pulse Combustion", Prog. Energy Combust, Sci, Vol. 12, pp. 43~79.
- (2) D. Reay, 1969, "The Thermal Efficiency, Silencing, and Practicability of Gas-fired Industrial Pulsating Combustors", J. Institute of Fuel, pp. 135~142.
- (3) V. I. Hanby, 1969, "Convective Heat Transfer in a Gas-fired Pulsating Combustor", Trans. ASME, J. Engineering for Power, pp. 48~52.
- (4) V. I. Hanby, 1971, "Basic Considerations on the Operation of a Simple Pulse Combustor", J. Institute of Fuel, pp. 595~599.
- (5) S. T. Vogt, N. S. Yen, R. J. Schoenhals, Werner Soedel, 1980, "Performance of a Pulse Combustion Gas-fired Water Heater", Trans. ASHRAE, Vol. 86, pp. 126~141.
- (6) S. H. Oh, 1983, "Acoustic Modelling and Analysis of Pulsating Combustion in a Gas-fired Pulse Burner". Ph. D. Dissertation, Univ. of Illinois at Chicago.
- (7) 久岡聖 外 4 名, 1982, "小型パルス燃焼器の研究", 第20回 燃焼シンポジウム前刷集, pp. 356~358.
- (8) 大岩紀生 外 4 名, 1986, "パルス燃焼に關する 實驗的 研究", 日本機械學會論文集(B編), 第52卷, 第476號, pp. 1913~1922.
- (9) 齊藤和天 外 3 名, 1986, "パルス燃焼器の熱發生速度に關する 實驗的研究", 日本機械學會論文集(B編), 第52卷, 第479號, pp. 2722~2728.
- (10) J. L. Muller, 1967, "The Development of a Resonant Combustion Heater for Drying Applications", The South African Mechanical Engineer, Feb., pp. 137~146.
- (11) J. A. C. Kentfield, 1977, "A New Light Weight Warm Air Blower for Rapidly Pre-Heating Cold-Soaked Equipment", ASME Paper, 77-WA/HT-20.
- (12) J. A. C. Kentfield, R. Rehman, E. S. Marzouk, 1977, "A Simple Pressure-Gain Combustor for Gas Turbines", Trans. ASME, J. Engineering for Power, pp. 153~158.
- (13) M. Rehman, 1976, "A Study of a Multiple-Inlet Valveless Pulse Combustor", Ph. D. Thesis, Univ. of Calgary.
- (14) J. A. C. Kentfield, A. Rehman, J. Cronje, 1980,

- “Performance of Pressure-Gain Combustors Without Moving Parts”, J. of Energy, Vol. 4, No. 2, pp. 56~63.
- (15) P. Bogden, W. Stanislaw, 1984, “On Modelling of Pulse Combustors”, Twentieth Symposium (Int.) on Combustion, pp. 2019~2024.
- (16) 吳相憲, 崔炳輪, 林光烈, 1987, “空氣벨브型 脈動 燃燒器의 特性에 관한 實驗的 研究”, 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第2號, pp. 271~278.
- (17) 林光烈, 崔炳輪, 吳相憲, 1987, “空氣벨브型 脈動 燃燒器의 動的 特性에 관한 實驗的 研究”, 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第5號, pp. 846~855.