

<論 文>

# 空氣밸브型 脈動燃燒器의 特性에 관한 實驗的 研究

吳相憲\* · 崔炳輪\* · 林光烈\*\*

(1986年 11月 3日 接受)

## An Experimental Study of the Overall Characteristics in an Aero-Valved Pulsating Combustor

Sang Heun Oh, Byoung Ryun Choi and Kwang Ryoul Lim

**Key Words:** Pulsating Combustor(맥동연소기), Pressure Fluctuation(압력변동), Operating Frequency(작동주파수), Noise Intensity(소음강도), Fuel Injection Angle(연료분사각)

### Abstract

The experimental study was carried out to investigate the pressure fluctuation, operating frequency, noise emission and combustion characteristics in an aero-valved pulsating combustor.

Measurements of the pressure fluctuation, mean temperature and ion current inside the combustion chamber indicate that combustion phenomena are characteristically similar to those in the diffusion flame.

The measured frequency schedule indicates that the acoustic theory of the quarter wave tube can be approximated to give the operating frequency, but correction factor must be involved to estimate the correct operating frequency.

The spectral behavior of the noise emission exhibits that frequency bands with high noise intensity are narrowly restricted to the neighborhood of the operating frequency signalling the low-frequency combustion characteristics of the pulsating combustor.

Measurements of the operating characteristics as variation of the fuel nozzle diameter and injection angle with 4 fuel nozzles have been made, and it was found that the system produced the stable operating conditions up to the turn down ratio of 3 when the fuel nozzle diameter is 1.2 mm, and the optimum fuel injection angle is thought to be in the neighborhood of 30° radially.

### 1. 序 論

脈動燃燒器는 産業用 및 家庭用 熱機器로서 그 經濟

性, 콤팩트性, 低公害性이라는 特徵으로 인해 最近에 注目되고 있는 燃燒器이다.

脈動燃燒器는 결코 新技術은 아니며, 1900年代初에 프랑스에서 가스터어빈에의 應用이 試圖되었으며, 第2次 大戰에서 獨逸의 V-I 로켓에도 그 엔진부에 脈動 燃燒器를 利用했다. 또한 1960年代에 캐나다에서 家

\* 正會員, 釜山大學校 工科學 機械工學科

\*\* 正會員, 釜山大學校 大學院

庭用 보일러에 應用된 以來, 美國, 스위스, 日本 등에서 차례로 實用化되어 왔다.

脈動燃焼器는 從來의 連續式 燃焼器와는 燃焼方式이 다르며, 燃焼室內에서 反復되는 一種의 爆發燃焼에 의해 생기는 壓力의 上昇, 低下를 利用해서 空氣와 燃料을 吸引하는 自律燃焼器이다. 따라서 起動時 以外에는 燃焼用 送風팬이 不必要하며, 高速脈動燃焼가스에 의한 熱傳達率의 向上, 高負荷燃焼, 低 NO<sub>x</sub> 등과 같은 長點이 있는 反面, 振動騒音が 크다는 短點도 있다.

脈動燃焼器는 燃焼室 上流側에 位置하는 空氣流入部에 逆止밸브의 有無에 따라 크게 機械的 밸브型(mechanical valve type)과 空氣밸브型(aero-valve or valveless type)으로 구분되는데, 지금까지 實用化 및 大部分의 研究結果가 機械的 밸브型에 集中되어 왔는데<sup>(1-9)</sup>, 그 이유는 空氣밸브型은 燃焼가스의 逆流을 完全히 防止할 수 없으며 幾何學的인 形狀變化에 아주 민감하기 때문이다. 그러나 空氣밸브型에 있어서는 可動部(moving part)가 없다는 最大의 長點을 가지고 있기 때문에 空氣流入部를 통한 燃焼가스의 逆流을 最大限 防止시키거나, 逆流되는 燃焼가스를 完全히 利用할 수 있는 研究가 성공한다면 實用化의 價値는 대단하다고 생각한다.

空氣밸브型 脈動燃焼器의 作動사이클을 圖式的으로 나타내 보면 Fig. 1과 같다.

空氣밸브型에 관한 最近의 研究結果를 보면, Muller<sup>(10)</sup>가 폭물乾燥에의 應用에 關해서 研究를 했고, Kentfield<sup>(11-13)</sup> 등이 壓力계인을 利用한 가스터어빈의 應用 및 子熱器로서의 利用에 關한 研究를 했다.

이처럼 應用的 側面의 研究가 일부 있을 뿐 基礎的 燃焼 및 性能特性에 關해서는 아직 理解가 부족한 實情이다.

本 研究에서는 空氣밸브型 脈動燃焼器에 關한 理解를 더 增進시키기 위해서 基本的인 空氣밸브型 脈動燃

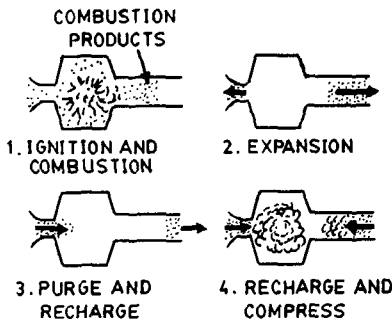


Fig. 1 Operating phases of an idealized aero-valved pulsating combustor

燒器를 製作해서 壓力脈動 및 發生되는 騒音特性, 作動周波數, 그리고 燃焼特性에 關해 實驗的 考察을 行했다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

Fig. 2는 本 實驗裝置의 構造 및 測定系統圖를 나타낸다.

本 基礎實驗用 脈動燃焼器는 실린더形의 空氣流入管과 燃焼室, 縮小管形의 燃焼後尾室, 確大管形의 排氣管, 燃料供給裝置, 點火用 스파이크플러그, 始動用 送風機로 構成된다. 燃料은 一般家庭用 프로판가스를 使用하였다.

本 燃焼器의 幾何學的 形狀變化는 排氣管길이를 813~1320mm 사이에서 7種類에 對해 變化를 시키고, 燃料供給노즐의 數를 4個로 固定시키고, 노즐直徑을 0.6~1.6mm 사이에서 0.2mm 간격으로 變化시키고, 또한 燃料噴射角을 半徑方向으로 25°~45° 사이에서 5° 간격으로 變化시켰다. 이 以外의 部分에 對한 形狀值數는 Table 1에 나타낸 值數로 固定시켰다.

空氣밸브型 脈動燃焼器의 設計基準은 아직까지 확립되어 있지 않으며, 주로 시행착오에 의해 설계되고 있으며, 지금까지 發表된 몇몇 길이비를 Table 2에 나타낸다. 길이비는 Table 2를 參考로 하여 決定했다.

J.L. Muller<sup>(10)</sup>에 의하면, 排氣管과 燃焼室의 斷面積

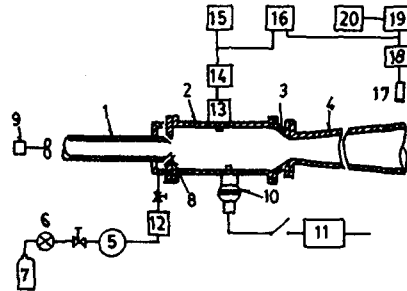


Fig. 2 Experimental apparatus and measuring systems

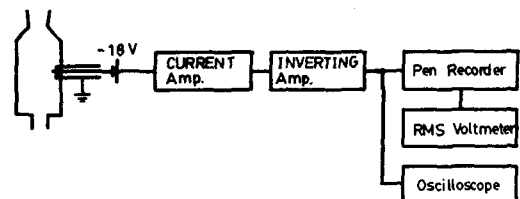


Fig. 3 Ion current measuring systems

**Table 1** Experimental size of an aero-valved pulsating combustor

(unit : mm)

Combustion chamber		Combustion chamber rear section		Air inlet pipe		Tailpipe		Fuel nozzle		
Diameter	Length	Half cone angle	Length	Diameter	Length	Half cone angle	Length	Number	Diameter	Injection angle
72.3	127	29.2°	38	35	140	1.3°	813~1320	4	0.6~1.6	25°~45°

**Table 2** Length ratio of the aero-valved pulsating combustors<sup>(14)</sup>

Combustors	Total length	Total length	Total length
	Inlet length	C.C. length	Tailpipe length
Hiller	9.25	6.9	1.34
Pornsiriponse	11.20	7.0	1.30
Fernando	7.95	6.89	1.37
Sadiq	7.80	6.6	1.39
Rehman	7.4	6.2	1.41
Author	7.99~11.61	6.78~9.85	1.23~1.38

C.C. : Combustion chamber

此는 0.25 보다 크게 하고, 空氣吸入管과 燃焼室의 斷面積比는 0.25 보다 작아야 하는 條件을 제시했으며, 斷面積比는 이 條件을 參考로 해서 決定했다.

實驗方法은, 스파이크플러그 및 送風機를 作動시킨 後 燃料을 噴射노즐을 통해 燃焼室內로 供給하고 오실로스코프를 통해 壓力脈動이 확인되면 스파이크 및 送風機의 構動을 停止시키고 나서 數分 後 安定된 脈動 壓力의 發生을 확인하고 測定을 行하였다.

壓力變動은, 燃焼室과 排氣管의 各 位置에 設置된 스트레인게이지形 壓力센서를 통해 受信된 信號를 시그널 콘더서너로 增幅시켜 FFT 信號分析器에 의해 時間 및 周波數分析을 했다.

燃焼器에서 發生되는 騒音은, 排氣管端으로부터 半徑水平方向으로 1m 떨어진 位置에 마이크로폰과 騒音計를 設置하여 受信된 騒音을 1/3 옥타브 밴드 필터링(filtering)시켜 레벨리코오더에 記錄했다.

平均溫度는 PR 熱傳帶(Pt/Pt-Rh 13%)로 測定했으며, 이 熱傳帶는 直徑 0.1mm의 PR 線과 直徑 3mm의 자기관(2holes)으로 構成된다.

燃焼室內의 이온濃度를 測定하기 위한 이온프로브는 直徑 0.1mm인 Pt 線과 直徑 3mm인 자기관으로 構成되며, 感應部는 자기관으로부터 0.5mm 돌출시켜 -18 V의 電壓에 의해 陽이온을 檢出하고 微小電流增幅器와 反傳增幅器로 增幅시켜 펜리코오더에 記錄시켰다.

Fig. 3은 이온電流의 測定系統圖를 나타낸다.

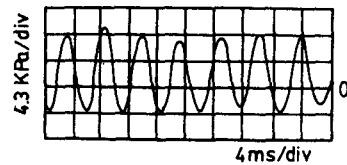
### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 壓力變動

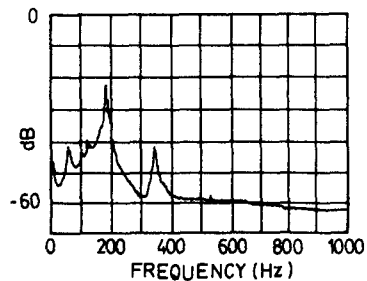
Fig. 4는 時間에 따른 燃焼室內의 壓力脈動의 一例를 나타내는데, 週期和 振幅이 거의 一定한 正弦波에 가까운 振動特性을 보여준다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 條件에서 壓力脈動을 周波數分析한 結果이다. 여기서 가장 큰 피크를 갖는 周波數가 185Hz라는 事實로부터, 이 周波數가 作動周波數임을 알 수 있으며, 또한 調和周波數特性이 나타나고 있지 않은데, 이는 音響學적으로 空氣流入管이 完全히 단절되지 않고 排氣管의 形狀이 斷面이 變化하는 確大管이라는 幾何學의 形狀의 영향이라고 推測된다.

Fig. 6은 排氣管길이와 燃料量에 따른 燃焼室에서의 平均壓力脈動幅의 變化를 나타낸다. 여기서 T.P.L.은



**Fig. 4** Traces of combustion chamber pressure as a function of time



**Fig. 5** Frequency spectrum of combustion chamber pressure

排氣管 길이이다.

平均壓力脈動幅의 決定은, 壓力脈動을 壓力變換器로 受信, FFT 信號分析器로 처리 (Fig. 4 參考)하여, 正의 피이크치 7個에 대해 平均值와 負의 피이크치 7個에 대한 平均值의 差를 平均壓力脈動幅으로 定했다. 이 그림에서 壓力脈動幅은 燃料의 增加와 더불어 增加하고 있으며, 排氣管 長이가 914mm 일 때 가장 크다. 결국 排氣管이 長어질수록 壓力脈動幅은 增加하다가 最大值를 갖고, 다시 減少한다는 事實을 알 수 있다.

Fig. 7 은 排氣管에서의 位置에 따른 壓力脈動幅의 크기를 나타낸다. 이 그림에서 壓力脈動幅은 燃燒室에서 最大值 (pressure antinode)를 갖고 排氣管出口로 감에 따라 減少하다가 出口에서 最小值 (pressure node)를 갖는다. 그러나 排氣管에서의 壓力振動모우드가 4/1 波長파이프의 音響學的인 振動모우드와는 다소 다른

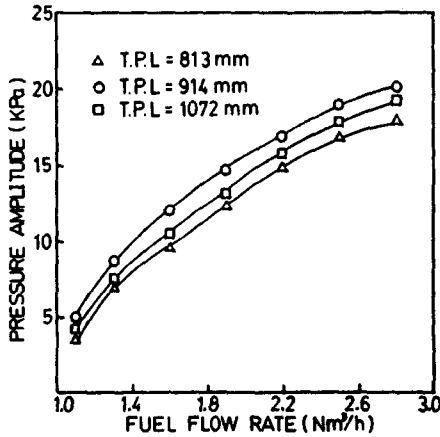


Fig. 6 Variation of pressure amplitude of combustion chamber with fuel flow rate

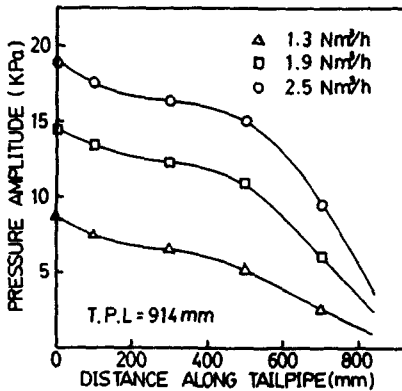


Fig. 7 Distribution of pressure amplitude along the tailpipe

저그러진 모양을 보이고 있는데, 이는 排氣管의 確大管形狀의 영향으로 보인다.

壓力振動모우드가 定常波 (standing wave)라 가정하면, 壓力脈動으로부터 速度脈動을 計算하는 式은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$A_v = \frac{\Delta P}{P_0} \frac{C}{K} \tan \frac{2\pi x}{\lambda}$$

여기서  $A_v$ 는 速度脈動幅,  $\Delta P$ 는 壓力脈動幅,  $P_0$ 는 大氣壓,  $\lambda$ 는 波長,  $x$ 는 排氣管에서의 燃燒室로부터의 거리,  $C$ 는 音速,  $K$ 는 燃燒가스의 比熱比를 나타낸다. 이 式에 의해 排氣管에서의 速度脈動幅을 計算한 結果를 Fig. 8에 나타낸다. 이처럼 壓力振動의 node는 速度振動의 anti-node에 對應되고, 壓力振動의 anti-node는 速度振動의 노우드 (node)에 對應된다.

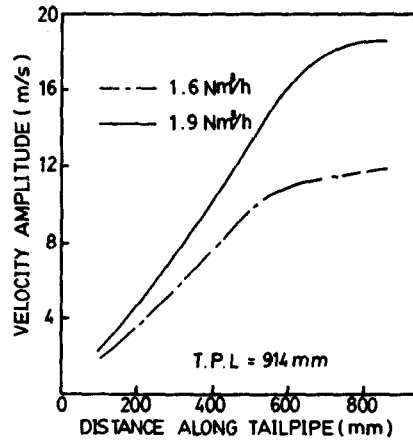


Fig. 8 Distribution of oscillating velocity amplitude along the tailpipe

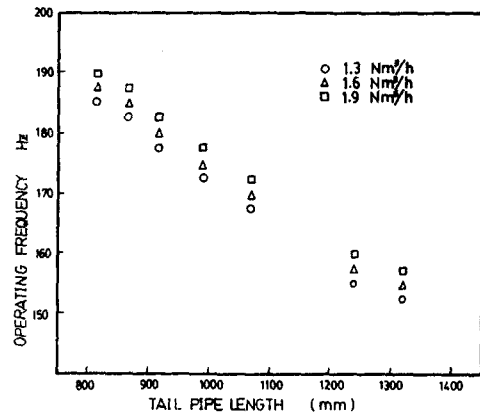


Fig. 9 Operating frequency as a function of tailpipe length

Fig. 9는 排氣管의 길이와 作動周波數의 關係를 나타낸다. 7種數의 排氣管 길이에 대해서 作動周波數를 測定했는데, 本 實驗범위에서는 作動周波數가 排氣管 길이에 거의 反比例하는 傾向을 나타낸다. 그러나 1/4 波長의 音響學的 共振周波數의 式을 적용해본 結果 最大 20%까지의 誤差가 있었으며, 이는 Fig. 7에서도 보여주듯이 燃焼反應 및 排氣管形狀 등 복잡한 影響에 의한 것이며, 作同周波數를 精確히 豫測하기 위해서는 복합적인 影響을 充分히 고려해서 1/4 波長의 共同周波數의 式을 修正해야 하며, 또한 周波數의 計算에 크게 影響을 미치는 音速을 精確하게 豫測하기 위한 燃焼器에서의 平均溫度를 精確하게 決定해야 하는 問題가 있다. 그러나 初期의 設計단계에서는 간단한 1/4 波長의 共振周波數式에 의해 概略적인 作動周波數는 豫測할 수 있다고 본다.

3.2 騒音特性

Fig. 10은 燃焼器에서 發生되는 騒音(overall sound

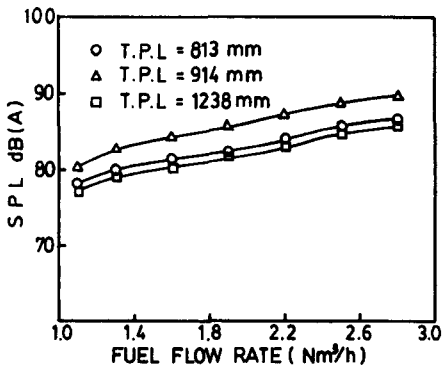


Fig. 10 Overall sound pressure level of noise

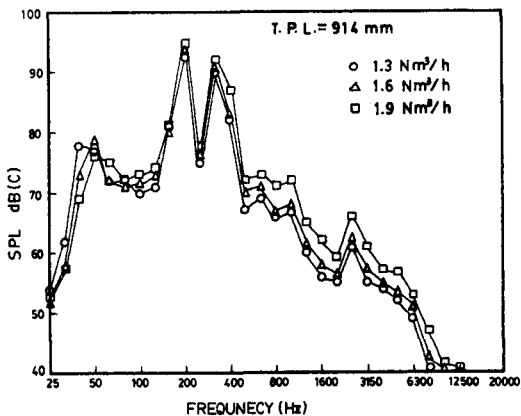


Fig. 11 Frequency spectra of noise in third octave band

pressure level)을 나타낸다. Fig. 6의 燃焼室에서의 壓力脈動幅의 結果와 比較하면 거의 비슷한 傾向을 보여주며, 本 實驗범위내에서 騒音의 音壓單位는 80~90 dB(A)程度를 보여줬다.

Fig. 11은 騒音을 1/3 옥타브 밴드로 周波數分析한 結果이다. 이 그림을 보면 높은 騒音強度를 나타내는 周波數 帶域이 作動周波數 근방의 좁은 帶域에서만 나타나는 低周波數 特性을 보인다.

3.3 燃焼特性

燃料의 噴射角과 直徑이 空氣噴咀型 脈動燃焼器의 性能에 미치는 影響을 觀察(燃料噴射노즐數는 4個로 固定)하기 위해 燃料의 噴射角을 半徑方向으로 45°에 대해 노즐直徑을 0.6mm 부터 0.2mm 간격으로 1.6mm 까지 增加시키며 오실로스코프를 통해 燃焼室內的 壓力脈動을 觀察했다. 이 結果, 0.8~1.4mm 사이에서는 거의 安定된 脈動燃焼가 觀察되었고, 0.6mm 와 1.6mm 인 경우는 不完全한 脈動燃焼에 의해 계속적인 運轉이 不可能하였다. 이는 燃料噴射速度가 너무 크거나 작으면 流入되는 空氣와의 相對速度에 의해 混合特性이 低下하기 때문이라고 생각된다. 그리고 0.8~1.4mm 사이에서는 1.2mm 인 경우가 脈動燃焼가 定常的으로 發生하는 燃料量의 범위가 가장 컸으며, 또한 이때의 턴다운비(turn down ratio : 作動範圍에서 最大燃料供給量과 最小燃料供給量의 比)는 3程度였다.

다음, 노즐直徑을 1.2mm 로 固定하고 燃料噴射角을 半徑方向으로 25°에서부터 5° 간격으로 45°까지 이 角度범위에서 最適噴射角을 決定하기 위해 噴射角에 따른 燃焼室內的 平均溫度와 이온濃度分布를 測定했다. 이 結果中 代表的인 45°와 30°에 대해 比較하기로 한다.

燃焼室內的 平均溫度를 軸方向으로 8個의 位置, 半徑方向으로 5mm 간격으로 7個의 位置, 總 54個의 位置에 대해 測定해서 等溫線圖를 作成하였다. 測定結果 半徑方向에 대해 對稱的인 溫度分布를 갖고 있으므로 半斷面에 대해서만 나타내기로 한다. 以下에서 燃焼室入口로부터 軸方向(下流方向)의 距離를 X, 燃焼室中心으로부터 半徑方向의 距離를 R로 表示한다.

Fig. 12는 燃料噴射角이 45°일 때 燃焼室의 溫度分布를 나타낸다. 이 그림을 보면 R=20~30mm, X=40~70mm 구간에서 最高溫度領域이 存在하며, 最高溫度는 1400K程度이다. 또한 R=10mm 부근 X=30~60mm 구간에서 溫度勾配가 가장 크게 나타나는 結果로 미루어 볼 때 이 領域에서 燃焼反應이 가장 활발하게

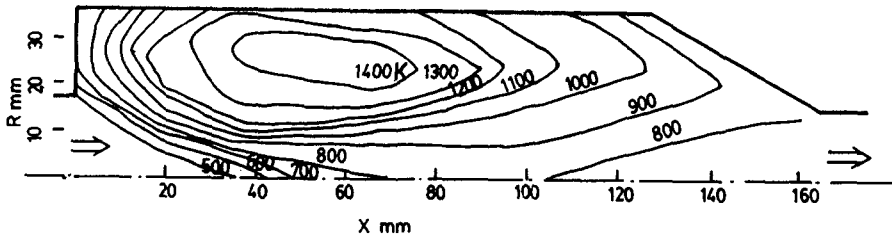
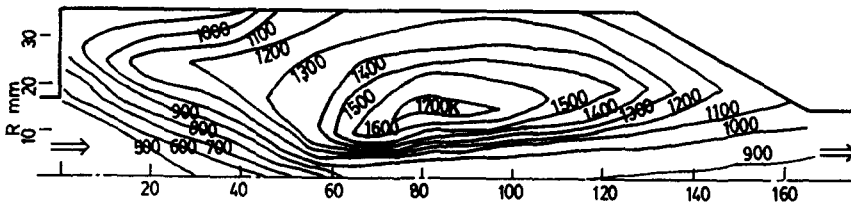
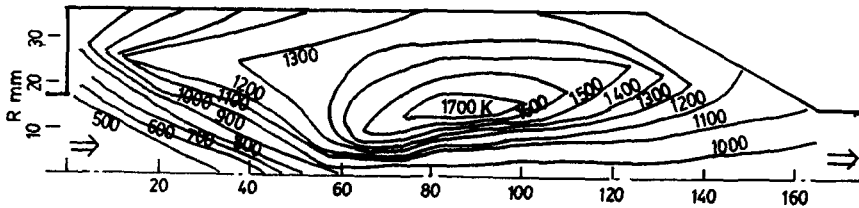


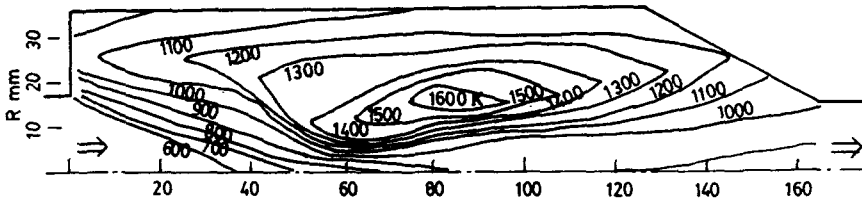
Fig. 12 Mean temperature distribution in the combustion chamber for fuel injection angle 45°



(a)



(b)



(c)

Fig. 13 Mean temperature distribution in the combustion chamber for fuel injection angle 30°

일어나는 것으로 推測된다. 결국 燃料噴射角이 크기 때문에 燃料과 空氣의 混合領域이 燃燒室 入口쪽에 치우쳐서 작아지고, 따라서 燃燒反應이 활발하게 일어나는 領域도 入口쪽에 치우친 작은 領域에서 일어나기 때문에 이로 인해 空氣吸入 및 燃燒가스의 排氣能力도 低下하리라고 豫想된다.

Fig. 13은 燃料噴射角이 30°일 때 溫度分布를 나타낸다. Fig. 13(a)는 Fig. 12와 排氣管 및 燃料量이 같은 條件에 대한 溫度分布인데  $R=5\sim 10\text{mm}$ ,  $X=60\sim 100\text{mm}$  구간에서 활발한 燃燒反應이 일어나고 있으며 軸方向에 대해 거의 燃燒室의 中央位置에 해당된다.

또한 最高溫度領域은  $R=10\sim 20\text{mm}$ ,  $X=75\sim 95\text{mm}$ 에서 나타나며 1700K 정도로써 Fig. 12에 비해 훨씬 높은 溫度이며 全體의인 溫度分布도 훨씬 높다. Fig. 13(b)는 Fig. 13(a)보다 燃料量이 增加된 條件에 대한 것이며 Fig. 13(a)와 거의 같은 溫度分布를 보여준다. Fig. 13(c)는 Fig. 13(a)보다 排氣管이 긴 條件에 대한 그림이며 거의 비슷한 溫度分布이다. 결국 排氣管 및 燃料量의 變化에 대한 커다란 溫度分布의 變化를 보이지 않는다.

이처럼 燃料噴射角이 燃料과 空氣의 混合領域과 燃燒特性에 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며,

最適燃料噴射角은 30° 근방이라고 판단된다.

또한 벨브가 있는 豫混合形 脈動燃焼器<sup>(8)</sup>에서는 燃焼室全體의 溫度分布가 거의 均一한데 비해 本 燃焼器에서는 아주 不均一하며 半徑方向으로 對稱인 溫度分布特性을 갖고 있으며, 따라서 擴散燃焼에 가까운 燃焼特性을 갖는 것으로 推測된다.

溫度分布를 통한 燃焼特性을 더 확인하기 위해 燃焼室內의 이온濃度分布를 測定했다. 反應이 활발한 火焰面부근에서 높은 이온濃度領域이 存在한다는 事實이 一般的으로 알려져 있다. 따라서 이온濃度가 反應強度에 比例한다고 보면 이온濃度の 測定에 의해 反應強度

에 관한 情報를 얻을 수 있다.

Fig. 14(a)와 (b)는 Fig. 13(a)와 같은 條件에서 各 各 平均이온과 變動이온의 RMS 值를 나타낸다. 이 그림을 보면  $R=5\text{mm}$  부근,  $X=82\text{mm}$  및  $97\text{mm}$  位置에서 이온電流의 平均值 및 RMS 值가 가장 크다는 結果로부터 이 領域이 가장 활발한 燃焼反應이 일어나고 있으며, Fig. 13(a)로부터 豫測된 結果와 일치하는 경향을 보여준다.

Fig. 15는 排氣管에서의 平均溫度分布를 나타낸다. 여기서 排氣管 出口로 감에 따라 溫度가 거의 線型的으로 減少함을 알 수 있다.

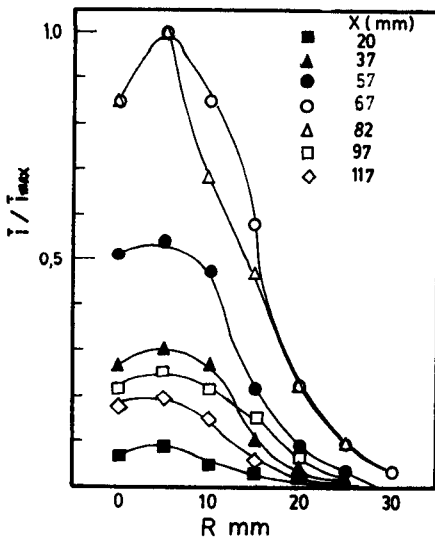


Fig. 14(a) Mean values of ion current

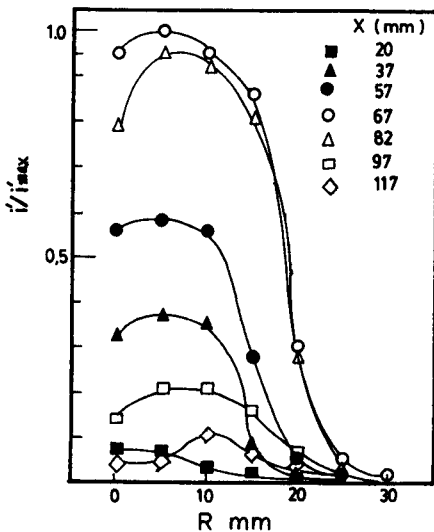


Fig. 14(b) RMS values of fluctuating ion current

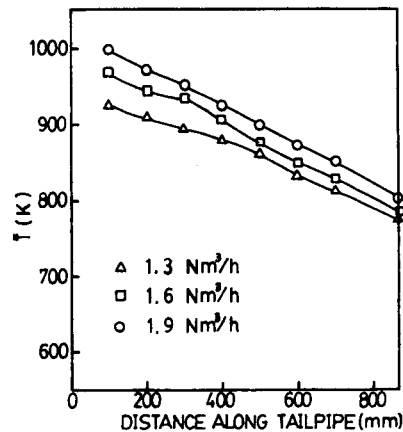


Fig. 15 Mean temperature distribution along the tailpipe

#### 4. 結 論

基礎實驗用 空氣 벨브型 脈動燃焼器를 製作하여 壓力脈動 및 騒音特性, 作動周波數, 燃焼特性에 關係 實驗的인 考察을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 燃焼現象은 燃料와 空氣의 擴散 및 混合過程에 의해 制御되는 擴散火焰의 特性에 가깝다.

(2) 壓力脈動은 正弦波의 振動모우드에 가깝고, 最大壓力脈動幅을 갖는 排氣管길이가 存在(本 實驗에서는 914mm 지만 燃焼器의 幾何學的 形狀에 따라 달라짐)한다.

(3) 作動周波數의 近似的인 값은 간단한 1/4 波長과 이프의 音響學的 理論으로 豫測(本實驗에서 最大誤差 20%)할 수 있으나, 正確한 豫測을 위해서는 燃焼反應 및 幾何學的 形狀(燃焼室 形狀 및 길이, 吸入管과 排氣管形狀 및 길이) 등의 影響을 考慮할 수 있는 補正이 必要하다.

(4) 높은 騒音強度가 나타나는 周波數帶域은 作動周波數 근방의 좁은 帶域에 局限되는 低周波數特性을 갖고 있지만, 機械的 벨브型에 比해서는 다소 높은 周波數特性을 갖는다.

(5) 燃料噴射노즐數가 4 개인 경우, 노즐直徑이 0.8 ~ 1.4mm 사이에서 安定된 脈動燃焼가 發生하며, 1.2 mm 일 때 turn down ratio 는 3 程度로 가장 크며, 最適燃料噴射角은 半徑方向으로 30° 근방이라고 豫想된다.

## 後 記

本 研究의 一部는 1984 年度 韓國科學財團의 研究費에 의해 이루어 졌으며, 同 財團 關係諸位께 깊은 謝意를 表합니다.

## 參 考 文 獻

- (1) D. Reay, "The Thermal Efficiency, Silencing, and Practicability of Gas-fired Industrial Pulsating Combustors", J. Institute of Fuel, pp.135~142, 1969
- (2) V.I. Hanby, "Convective Heat Transfer in a Gas-fired Pulsating Combustor", Trans. ASME, J. Engineering for Power, pp.48~52, 1969
- (3) V.I. Hanby, "Basic Considerations on the Operation of a Simple Pulse Combustor", J. Institute of Fuel, pp.595~599, 1971
- (4) Proceedings of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications, Nov. 29-30, Argonne National Lab., pp.144~162, 1979
- (5) S.T. Vogt, N.S. Yen, "Performance of a Pulse Combustion Gas-fired Water Heater", Trans. ASHRAE, Vol. 86, pp.126~141, 1980
- (6) S.H. Oh, "Acoustic Modelling and Analysis of Pulsating Combustion in a Gas-fired Pulse Burner", Ph. D. Dissertation, Univ. of Illinois at Chicago, 1983
- (7) 久岡聖外 4 名, "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, 1982
- (8) 大岩紀生外 4 名, "パルス燃焼に関する實驗的研究", 日本機械學會論文集(B編), 第 52 卷, 第 476 號, pp.1913~1922, 1982
- (9) 齊藤和天外 3 名, "パルス燃焼器の熱發生速度に関する實驗的研究", 日本機械學會論文集(B編), 第 52 卷, 第 479 號, pp.2722~2728, 1986
- (10) J.L. Muller, "The Development of a Resonant Combustion Heater for Drying Applications, The South African Mechanical Engineer", Feb., pp.137~146, 1967
- (11) J.A.C. Kentfield, "A New light Weight Warm-Air Blower for Rapidly Pre-Heating Cold-Soaked Equipment", ASME Paper, 77-WA/HT-20, 1977
- (12) J.A.C. Kentfield, R. Rehman, E.S. Marzouk, "A Simple Pressure-Gain Combustor for Gas Turbines", Trans. ASME, J. Engineering for Power, pp.153~158, 1977
- (13) Proceedings of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications, Nov. 29-30, Argonne National Lab., pp.22~45, 1979
- (14) M. Rehman, "A Study of A Multiple-Inlet Valveless Pulsed Combustor", Ph. D. Thesis, Univ. of Calgary, January, 1976