

# 對向噴出焰 燃燒方式에 의한 NO<sub>x</sub> 生成低減과 燃燒特性 研究 (I)<sup>1</sup>

A Study on NO<sub>x</sub> Pollutant Reduction and Combustion Characteristics of  
Opposed-Jet-Flame Combustion Process (I)

趙慶國\*, 鄭仁碩\*, 鄭景哲\*\*  
K. K. Cho, I. S. Jeung, K. S. Jeong

## ABSTRACT

Combustion process or progress and NO<sub>x</sub> pollutant reduction behavior of opposed-jet-flame combustion process in a dual-prechamber-divided-combustion-chamber were investigated by using high speed schlieren photography, chamber pressure measurement, and diluted NO<sub>x</sub> sampling technique.

Results show that opposed-jet-flame combustion process can motivate considerably higher chamber peak pressure and significant lower NO<sub>x</sub> emission than any other combustion processes studied simultaneously as the comparison experiments. The combustion process of opposed-jet-flames is suggested as so-called 'Internal exhaust gas recirculation' process.

## 記 號

$A_{ori}$  : 오리피스 斷面積

$D$  : 오리피스 直徑

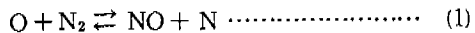
$V_m$  : 主燃燒室容積

$V_p$  : 副燃燒室容積

$W$  : 噴出速度

( )<sub>c</sub> : 臨界狀態에 해당되는 量

것으로 받아들여지고 있다.<sup>1)</sup>



또 過稀薄混合氣의 燃燒時 NO 生成率은 다음과 같이 表示된다.<sup>2)</sup>

$$\frac{d}{dt} [NO] = 6 \times 10^6 T_{eq}^{1/2} \exp(-69060/T_{eq})$$

$$\cdot [O_2]_{eq}^{1/2} [N_2]_{eq}^{1/2} \text{ moles/cm}^3 \cdot \text{sec} \dots\dots\dots (3)$$

## 1. 序 論

대부분의 燃燒器로부터 排出되는 질소산화 물의 主種을 이루는 것은 Thermal NO이며, 그 生成은 다음의 Zeldovich反應式에 따르는

式 (3)에 나타났듯이 NO 生成率은 火焰面後 面의 燃燒가스 溫度에 매우 민감하고, 溫度가

1. 本 研究의 一部內容은 1987年 7月7日~7月10日 開催된 第10次 國內外科學技術者學術大會에서 發表 된 바 있었음.

\* 正會員, 서울大學校 航空工學科

\*\* 서울大學校 航空工學科

1,800°K 以下로 유지되면 Thermal NO의 生成은 매우 낮은 水準이 된다.<sup>3)</sup> 그런데 위의 反應速度는 燃燒反應과 比較하면 매우 느리기 때문에 燃燒反應과는 別個로 進行되는 非平衡化學反應이며, 대부분의 NO는 火焰面 後面에서 生成된다.<sup>4)</sup> 그러므로 燃燒系가 高溫狀態로 유지되는 時間이 길면 NO의 生成量은 增加하는 傾向을 보인다.<sup>5)</sup>

NO<sub>x</sub>의 生成低減을 爲해 現在까지 研究되어 온 方式들은 주로 直接的인 方法에 의하여 火焰面の 溫度를 낮추는 것이다.<sup>6)</sup> 그런데 NO<sub>x</sub> 生成低減을 目的으로 火焰面の 溫度를 강화시키면 HC, CO 등의 生成增加와 燃料經濟性的 惡化를 수반하게 되며, 火焰面の 溫度를 上昇시키면 HC, CO 등의 生成은 抑制되고 燃料經濟性的 向上은 可能하지만 NO<sub>x</sub>의 生成은 增加하는 서로 배치되는 傾向이 나타난다.<sup>7)</sup> 그러므로 만일 燃燒器의 效率를 低下시키지 않으면서 NO<sub>x</sub>의 生成을 저감시킬 수 있으면 매우 바람직한 燃燒方式이 될 것이다.

定積燃燒器의 경우에는 燃燒效率를 燃燒最高壓力로 대신하여 表現할 수 있는데, 本 研究에서는 著者들이 수행한 바 있었던 以前의 研究를 통하여 燃燒最高壓力의 上昇이 可能한 것으로 確認된 分割定積燃燒器<sup>8)</sup>를 利用하여 對向噴出焰 燃燒方式의 燃燒特性和 이 방식에 있어서의 NO<sub>x</sub> 生成에 관하여 調査하고 他 燃燒方式에 있어서의 結果와 比較한 他 研究結果와도 檢討하여 對向噴出焰 燃燒方式의 有用성을 評價하고자 한다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

### 2-1 燃 燒 室

全體的으로는 四角柱를 分割한 形態로 中央의 主燃燒室과 左右에 位置한 2個의 副燃燒室로 構成되어 있다. 主燃燒室과 副燃燒室은 圓形的 orifice를 통하여 연결되어 있다. 主燃燒室의 體積( $V_m$ )은 375 cc(50×50×150 mm) 이고 副燃燒室의 體積( $V_p$ )은 主燃燒室體積의 0~33%로 變化가 可能하며, 오리피스의 直徑

( $D$ )은 0~20 mm로 變化 可能하다. 燃燒室의 材質은 Aluminium 2024이며 燃燒室의 前後面에 設置된 유리창(두께 19 mm)을 통하여 火焰傳播의 可視化가 可能하다.

本實驗에서는 副燃燒室의 크기가  $V_p/V_m = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ 인 4種類와 오리피스  $D=3.8, 5, 7, 10$  mm의 4種類를 組合하여 使用한다. 양부연소실의 끝부분에는 混合氣의 點火를 위한 點火플러그가 設置되어 各各의 點火裝置(C. D. I.)에 연결되어 있다. 主燃燒室과 副燃燒室 벽면에는 燃燒室 壓力測定素子와 가스吸入 및 排出用 밸브가 設置되어 있다(其他 實驗裝置의 상세한 內容은 參考文獻(8)을 參照하도록 한다).

### 2-2 燃 燒 方 式

實驗에 利用된 燃燒器의 副燃燒室 利用形式에 따라 主燃燒室 燃燒方式, 單一副燃燒室 燃燒方式 및 對向 副燃燒室 燃燒方式으로 區分한다. 左右의 副燃燒室을 閉鎖함으로써 通常의인 燃燒方式이라고 할 수 있는 主燃燒室 燃燒方式의 實驗을 行함으로써 主燃燒室內의 火焰傳播過程이 層流 火焰傳播임에 反하여 副燃燒室 燃燒方式의 實驗結果가 亂流 火焰傳播인 點으로 두 가지 크게 大別된 實驗結果를 比較할 수 있도록 한다.

單一副燃燒室方式은 左右 한 個의 副燃燒室만을 使用한 경우이며, 對向 副燃燒室方式은 左右의 副燃燒室 모두를 使用한 것으로 各 副燃燒室로부터 噴出되는 噴出火焰이 主燃燒室內에서 충돌하게 된다. 主燃燒室 燃燒方式의 경우는, 다시 한 쪽 끝에서만 點火하는 單一 點火方式和 양쪽 끝에서 同時에 點火하는 二重點火方式을 擇하여 傳播火焰이 燃燒室 中央에서 충돌하게 함으로써 單一副燃燒室 燃燒方式和 對向副燃燒室 燃燒方式의 두 경우에 對應하도록 하였다. 이 중에서 對向 副燃燒室에서 噴出되는 火焰이 主燃燒室의 燃燒에 關係하므로 이때의 燃燒方式을 對向 噴出焰 燃燒方式이라고 稱한다.

### 2-3 豫混合氣와 排氣가스 稀釋

可燃性混合氣로는 純度 99.9%의 프로판과 건조공기를 豫混合하여 使用하며, 混合氣 탱크內에서 팬에 의하여 교반을 함으로써 時間變化에 따른 豫混合氣의 局部的인 混合濃度의 不均一性 發生原因을 제거한 豫混合氣 製作裝置를 利用한다.

燃焼가 終了되면 燃焼排氣가스는 NOx有害生成物을 分析하기 위하여 NOx分析機의 測定範圍(0~500ppm)와 測定에 所要되는 適正의 試料流量(1 liter/min)에 相當하게 不活性인 아르곤가스로 稀釋하여 分析後 稀釋比로 逆算하도록 한다.

### 2-4 實驗方法

燃焼室內에 均一한 豫混合氣를 大氣壓狀態로 충전하고, 유동이 停止된 狀態에서 點火하여 實驗을 시작한다. Fig.1은 實驗裝置의 계통도이다. 먼저 高速度 카메라(日本 Hitachi, 16HM)로 撮影을 시작하여 設定된 撮影速度(約 6,000 pictures/sec)에 도달하면, 同期回路에 의하여 펄스가 發生한다. 이 펄스에 의해 C. D. I.가 동작하여 副燃焼室內의 混合氣에 點火된다. 同時에 이 펄스에 의하여 同期된 小型 電子計算機(美國 DEC, PDP-11/23)는 壓電形壓力測定素子(美國 PCB, 101 A06)에 의해 測定된 燃焼室 內部 平均壓力을 A/D 變換하여 記憶한다.

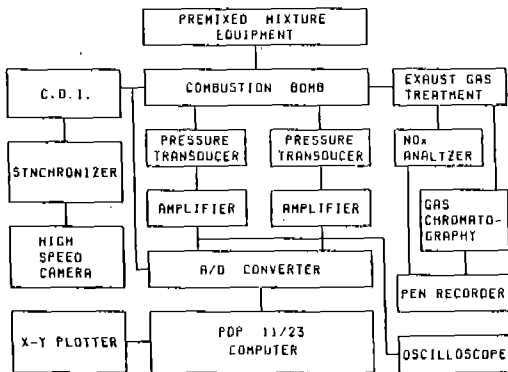


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Equipments

燃焼가 終了되면 眞空의 試料채취병(2liter 容量)에 燃焼排氣가스를 채취하고 아르곤가스로 稀釋하여 化學發光法을 應用한 NOx 分析機(日本 Yanaco, ECL-77 A)에 의해 分析하고 그 結果는 판레코더에 記錄한다.

每實驗은 再現性的 檢定을 위하여 同一條件下에서 10回 이상 實驗하여 그 平均値를 資料로 擇하였다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

#### 3-1 主燃焼室 燃焼方法

主燃焼室 燃焼方式에 있어서 層流火焰傳播過程의 슬리렌 寫眞의 한 예를 Fig.2에 보인다. Fig.2(a)는 單一點火에 의한 것으로 初期의 火焰傳播는 中央部에서의 傳播가 벽면쪽에서의 傳播에 比하여 빠르게 進行된다. 약 20 msec 경과하면, 燃焼室 길이 의 약 0.7倍되는 位置에서 火焰面이 벽에 닿게 되고<sup>9)</sup>, 그 후 火焰中央部는 未燃가스의 壓縮으로 因해 形成된 流動場에 의하여 火焰面이 全般的인 進行方向과 反對로 이동하고, 벽면 가까운 部分에서는 계속적으로 火焰傳播가 이루어져서 全體的인 火焰形態는 뒤집힌 모양이 되고 여기에 미세한 셀構造가 나타났다. 이것은 전형적인 튜립火焰(tulip flame) 形態이며 他研究結果와도 일치하는 現象이다.<sup>10,11)</sup> 그 후에는 火焰이 初期에 比해 느린 速度로 傳播하여 나머지 30%를 傳播하는데 以前의 70%를 傳播하는데 소요된 時間의 約 2倍가 所要된다.

Fig.2(b)는 二重點火한 경우의 것으로서, 初期段階에서는 양끝에서 傳播하는 火焰面의 形態가 單一點火한 경우와 같지만, 時間이 경과함에 따라서 單一點火의 경우와 比較할때 火焰進行 方向의 벽면 부근에서는 더 빨리 傳播하고 中心軸 부근에서는 늦게 傳播하는 形態를 나타낸다. 火焰傳播가 약 90% 進行되었을 때 中心軸 부근에서보다 벽면 부근에서의 火焰傳播가 빨라지기 시작하는데, 單一點火의 경우와는 달리 火焰面이 뒤집히지 않은 狀態에서 미세한 셀構造가 나타난다. 또한 火焰傳播는 單一點火에서와 같이 느려지지 않고 火

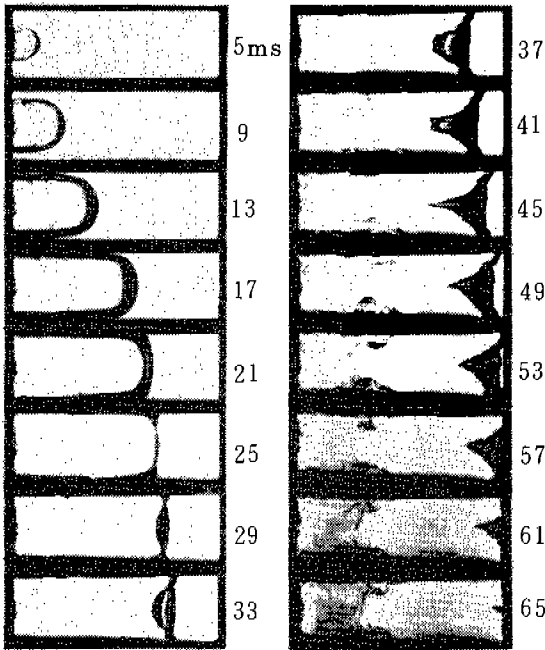


Fig. 2 (a)

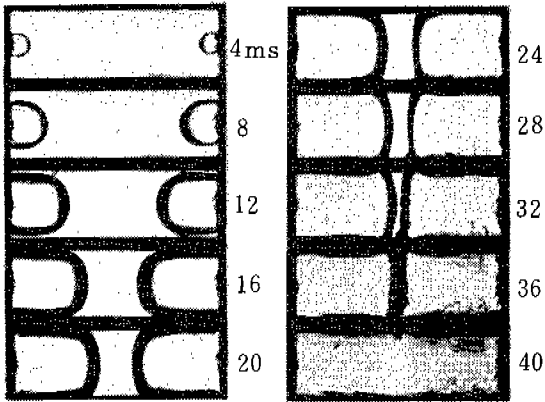


Fig. 2 (b)

Fig.2 Typical High Speed Schlieren Photographs of Laminar Flames Propagating in Main Chamber ; Mixture Ratio=3.8 %  
(a) Single Spark (b) Dual Spark

焰面이 서로 만나게 되어 殘留未燃가스를 燃燒시키면서 終了된다.

Fig.3은 Fig.2에 해당되는 경우의 燃燒室內 平均壓力 上昇曲線을 表示한 것이다. 二重點火한 경우의 壓力增加 시작시기가 單一點火의 경우보다 빠르고 더 높은 最高壓力을 나타내

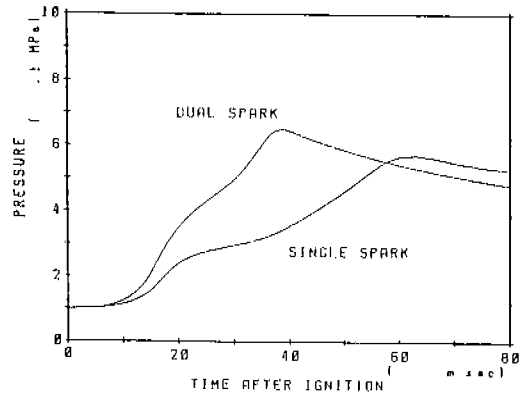


Fig.3 Pressure History of Laminar Flames Propagating in Main Chamber ; Mixture Ratio=3.8 %  
(a) Single Spark (b) Dual Spark

는 것은 슬리렌 寫眞에 있어서 燃燒完了時間이 二重點火 경우가 短縮된 것으로부터 쉽게 理解될 수 있다. 그림에서 壓力이 上昇하기 시작한 이후 壓力의 增加率이 둔화되는 時期는 슬리렌 寫眞에 있어서 火焰面 不安定構造가 나타나며 傳播速度가 減少되는 時期와 일치하고 있다. 또 最高壓力을 指示하는 時期는 슬리렌 寫眞에서 燃燒가 終了되는 時期와 일치됨을 보이고 있어 總燃燒時間은 點火時期로부터 燃燒 最高壓力을 指示하는 時期까지의 時間으로 定義하며, 燃燒最高壓力, 總燃燒時間, NOx 生成量, 燃燒方式間의 相互關聯性을 表示하도록 한다. 單一點火 경우의 燃燒最高壓力이 二重點火 경우에 비하여 낮게 나타나는 것은 거의 같은 時期에 不安定火焰構造가 나타나지만 그후 燃燒終了時間이 相對적으로 길기 때문에 燃燒室 벽으로의 冷却에 의한 熱損失이 많은 것에 기인한다.

프로판-空氣體積混合比를 變化하며 實驗하여 各 混合比에 따른 燃燒最高壓力과 總燃燒時間을 Fig.4와 Fig.5에 各各 表示한다. 單一點火 및 二重點火 두 경우 모두 炭化水素系 燃料가 一般的인 特徵으로 나타나는 當量比 1.1에 해당되는 混合比 4.4%인 경우 最大 燃燒壓力과 最小 總燃燒時間이 나타났다.<sup>12)</sup> 同一한 混合比에 대하여 二重點火한 경우가 單一

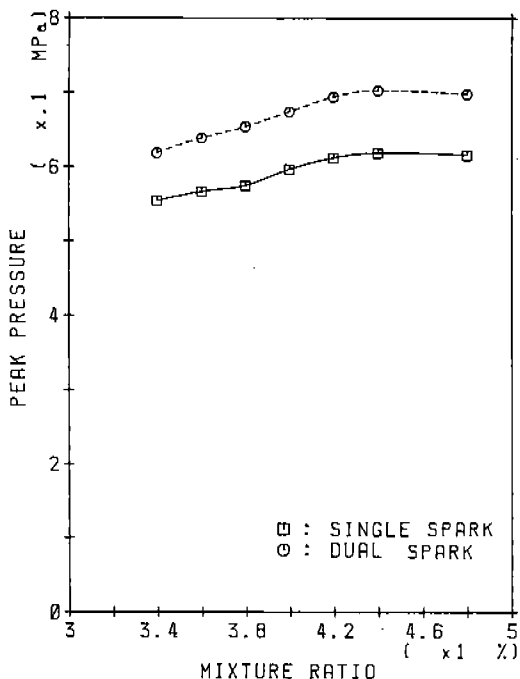


Fig. 4 Combustion Chamber Peak Pressure of Laminar Flames

點火한 경우보다 燃燒最高壓力이 約 11~14% 增大되었고 總燃燒時間은 約 40% 정도 短縮되었다. 이것은 燃燒繼續時間을 短縮시키면 燃燒室벽으로의 진열 일손실을 減少시켜 燃燒室平均溫度가 上昇되기 때문에 燃燒室壓力이 上昇되는 것이다. 따라서 一般的으로 燃燒室平均溫度는 燃燒室壓力으로 代치하여 考慮할 수 있어 NO<sub>x</sub>의 生成은 燃燒系溫度와 直接的으로 關係하고 있으나 燃燒室壓力으로 關聯지어 그 關係를 解析하면 燃燒室壓力이 또한 燃燒器의 效率(혹은 出力에 關聯된 點에서)을 代表하게 되어 直接的으로 燃燒器效率과 NO<sub>x</sub> 生成과의 關係를 究明할 수 있게 된다.

Fig. 6에는 各 混合比에 따른 NO<sub>x</sub> 生成濃度を 나타낸다. 一般的으로 炭化水素燃料의 燃燒에 있어서 알려져 있는 바와 같이 NO<sub>x</sub> 生成에 必要한 平衡酸素濃도와 火焰面 溫度가 均衡을 이루는 混合比 3.8%(當量比 0.95)에서 NO<sub>x</sub> 生成量이 最大가 됨을 알 수 있다.<sup>13)</sup> 二

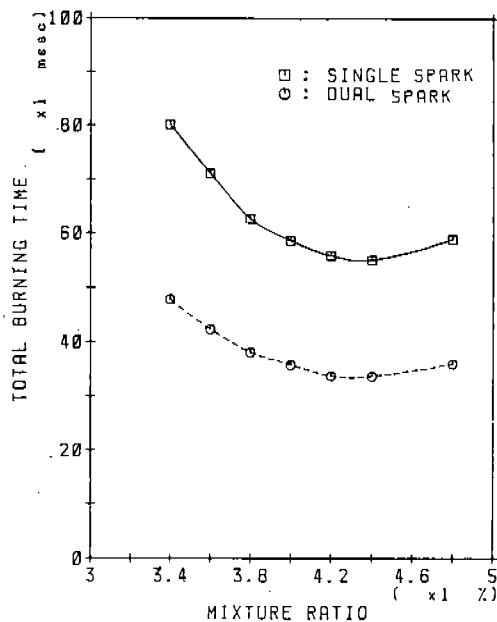


Fig. 5 Total Burning Time of Laminar Flames

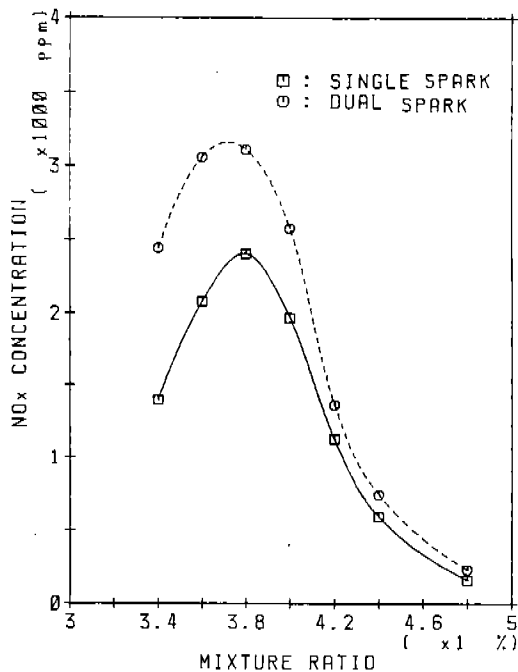


Fig. 6 NO<sub>x</sub> Concentration of Burned Gas of Laminar Flames

重點火한 경우가 單一點火한 경우보다 NO<sub>x</sub> 生成이 20~75% 增加되는데 이것은 燃燒室 壓力이 높아지는 것(즉, 燃燒室平均溫度가 高溫狀態로 維持되고 있는 것) 때문에 비평형 NO<sub>x</sub> 生成化學反應時間의 影響보다는 平衡溫度의 影響이 支配的인 것으로 思料된다. 이 結果는 他實驗結果와 綜合하여 再檢討하도록 한다.

3-2 副燃燒室 燃燒方式

앞의 主燃燒室 燃燒方式에 의한 實驗結果 NO<sub>x</sub> 의 生成은 混合比 3.8%에서 가장 뚜렷한 特徵을 나타내므로 여기서는 混合比 3.8%인 混合氣만을 使用하여 同一한 混合比의 可燃性混合氣의 燃燒에 미치는 副燃燒室體積 및 오리피스의 影響을 調査하였다. 副燃燒室燃燒方式에 있어서 重視的인 觀點에서 볼 때 主燃燒室內의 火焰傳播形態를 조절하게 된 結果, 外面的으로 나타난 現象中에서 NO<sub>x</sub> 生成에 關하여 主視하면, NO<sub>x</sub> 生成에 影響을 미치는 重要한 因子는 副燃燒室로부터 主燃燒室로 噴出되는 噴出焰의 速度(W)이다. 그런데 이 噴出焰의 速度는 同一한 오리피스에 대해서는 副燃燒室의 크기가 커질수록 同一한 副燃燒室體積에 대하여는 오리피스斷面積(A<sub>ori</sub>)이 작아질수록 增加하는 傾向이 있고<sup>8)</sup>, 따라서 다음 관계로 表示될 수 있다.

$$W \propto (A_{ori}/V_p)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

그러므로 以後의 實驗結果는 變數(A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>)에 關하여 分析하도록 한다.

3-2-1 單一副燃燒室 燃燒方式

Fig. 7은 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub> 變化에 대한 燃燒室 最高 壓力과 總燃燒時間을 나타내는데 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>]<sub>c</sub> = 5 × 10<sup>-3</sup>/cm을 特性值로 하여 變化率이 相異한 것을 알 수 있다. 이것은 이 特性值를 基準으로 하여 火焰傳播形態가 相異함에 기인한다.<sup>8)</sup> 그림의 ■, ●은 比較를 위하여 單一點火主燃燒室 燃燒方式에 있어서의 燃燒室最高壓力과 總燃燒時間을 나타내고 있다. 여기서 보면 副燃燒室 燃燒方式을 利用한 경우의 燃燒最高壓

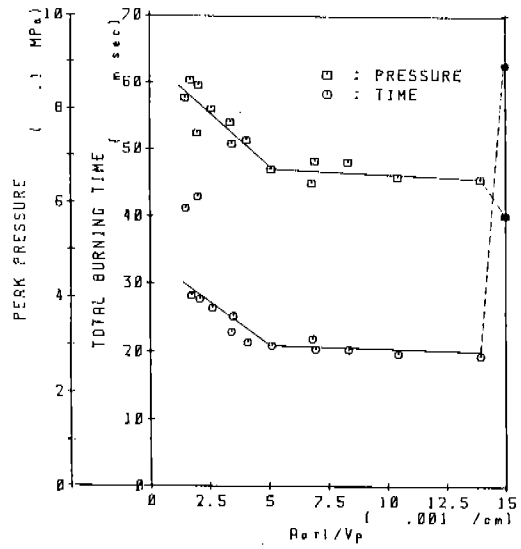


Fig.7 Combustion Chamber Peak Pressure and Total Burning Time wrt A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>; Single Prechamber, ●, ■ represent total burning time and combustion chamber peak pressure of the case of Main Chamber Combustion with single Spark

力은 主燃燒室 燃燒方式의 그것보다 높은 壓力을 指示하고 있으며, 總燃燒時間은 反對로 副燃燒室 燃燒方式의 경우가 짧은 것을 보이고 있다.

그런데 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub> > A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>]<sub>c</sub> 일때는 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>가 變化하여도 壓力은 거의 變化하지 않으나 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub> < A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>]<sub>c</sub> 때는, A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>가 減少함에 따라 燃燒最高壓力은 점차 增加하는 傾向이고 總燃燒時間도 燃燒最高壓力과 同一한 傾向을 나타내지만 主燃燒室 燃燒方式 경우보다는 短縮됨을 보이고 있다.

Fig.8은 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub> 變化에 따른 單一副燃燒室 燃燒方式과 對向副燃燒室 燃燒方式에 있어서의 NO<sub>x</sub> 生成濃度を 나타낸다. NO<sub>x</sub> 生成量도 A<sub>ori</sub>/V<sub>p</sub>]<sub>c</sub>를 基準으로 하여 서로 相異한 傾向을 表示하며 이 結果는 Fig.7과 유사한 傾向이다. 그런데 NO<sub>x</sub> 生成量은 Fig.6과 比較할 때 어떤 方式의 主燃燒室 燃燒方式을 利用한 경우의 NO<sub>x</sub> 生成量보다 增加된 것이다.

이 結果들을 綜合하면 單一副燃燒室 燃燒方

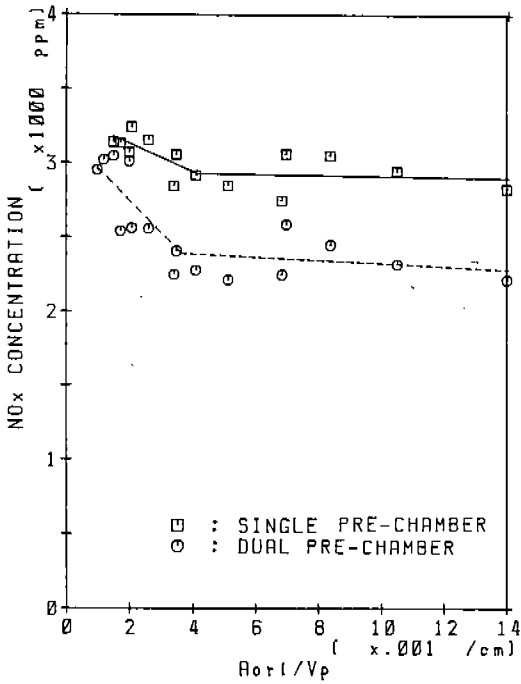


Fig. 8 NOx Concentration of Burned Gas wrt  $A_{ori}/V_p$

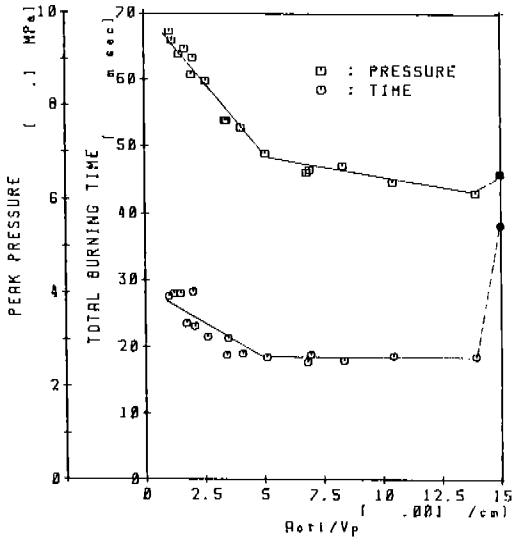


Fig. 9 Combustion Chamber Peak Pressure and Total Burning Time wrt  $A_{ori}/V_p$ ; Dual Prechamber, ●, ■ represent total burning time and combustion chamber peak pressure of the case of Main Chamber Combustion with Dual Spark

式을 利用하면 總燃焼時間을 短縮하고, 燃焼室 最高壓力을 上昇시킬 수 있으나 NOx의 生成量 增加는 抑制할 수 없다는 것을 意味한다.

### 3-2-2 對向副燃焼室 燃焼方式

Fig. 9는  $A_{ori}/V_p$  變化에 對한 燃焼室 最高壓力과 總燃焼時間을 表示한 것이다. 그림중에서 ■, ●는 二重點火 主燃焼室 燃焼方式의 燃焼室 最高壓力과 總燃焼時間을 나타내고 있다. 그림에서  $A_{ori}/V_p < A_{ori}/V_{p,c}$  일 때는  $A_{ori}/V_p$  가 감소하면 燃焼室 最高壓力은 점차적으로 增大되어 이 경우의 기울이는 單一副燃焼室 燃焼方式의 結果(Fig. 7)보다도 더욱 급하다. 즉 더욱 上昇된 燃焼室 最高壓力을 얻을 수 있다는 것을 意味한다. 그리고  $A_{ori}/V_p > A_{ori}/V_{p,c}$  일 때는 거의 一定한 燃焼室 壓力이 表示되며 主燃焼室 燃焼方式에 있어서의 燃焼室 最高壓力보다는 다소 減少 혹은 增加된 散布된 값을 指示하나 根本的으로 거의 一定한 값이다.

그런데 總燃焼時間은 항상 主燃焼室 燃焼方式의 경우보다 短縮되며 單一副燃焼室 燃焼方式의 경우와는 거의 同一한 結果이다. 즉 以上으로 對向副燃焼室 燃焼方式을 使用하면 燃焼室 最高壓力을 가장 增大시킬 수 있으며 總燃焼時間은 가장 短縮시킬 수 있어 燃焼出力面에서는 가장 우수한 燃焼方式이라고 肯定할 수 있다.

그리고 Fig. 8에서 보면,  $A_{ori}/V_p$  變化에 따른 NOx 生成量 變化의 傾向은 單一副燃焼室의 경우와 유사하지만 生成 NOx 濃度值은 현저하게 減少되었음을 알 수 있고, 結果的으로 燃焼室 最高壓力을 最大限 上昇하면서 NOx 生成量은 현저하게 抑制할 수 있다.

### 3-3 燃焼室 最高壓力과 NOx 生成의 關係

定積燃焼器內에서 燃焼할 경우 燃焼室 溫度는 燃焼室 壓力으로 代치하여 表示될 수 있어 燃焼出力을 燃焼室 壓力으로 代表的으로 表示할 수 있으며 이것과 NOx 生成量과의 關係를 유도하면 燃焼出力과 NOx 生成과의 關係에 對한 各各의 燃焼方式의 長短點을 判定할 수 있으므로 以上の 實驗結果를 Fig. 10에 燃焼室

最高壓力과 NO<sub>x</sub> 生成量의 關係로 表示한다. 그림에서 일점쇄선으로 연결된 關係는 本 研究의 結果이며 실선으로 연결된 關係는 本 研究와 類似한 方法에 의한 實驗結果로 參考文 獻(15)의 關係를 比較를 위하여 引用한 것이

다. Fujimoto 등<sup>15)</sup>의 實驗은 네탄-空氣 豫 混合氣를 원판형 燃燒室內에서 燃燒하여 구한 결과이다.

두 가지 結果를 比較하면 主燃燒室 燃燒方 式에 있어서의 燃燒室 最高壓力과 이 경우의 NO<sub>x</sub> 生成關係는 本 研究나 Fujimoto 등의 結 果 모두 共히 거의 直線의인 傾向이다. 즉 燃 燒 出 力 을 增 大 시키면 NO<sub>x</sub> 生成量도 直線的으 로 增加한다는 것을 意味한다.

그리고 單一副燃燒室 燃燒方式을 使用하면 本 研究結果는 上昇可能한 燃燒室 最高壓力 範圍內에서는 燃燒出力을 增大시켜도 NO<sub>x</sub> 生成 量은 거의 一定한 값을 유지하나 本 研究의 對向副燃燒室 燃燒方式에 있어서의 NO<sub>x</sub> 生成 量보다는 增加된 값을 유지하므로 對向副燃燒 室 燃燒方式보다는 열세이다. Fujimoto 등의 結果를 檢討하면 燃燒室 最高壓力이 上昇하면 主燃燒室 燃燒方式의 경우보다 NO<sub>x</sub> 生成量은 둔화되지만 增加하는 傾向이다.

對向副燃燒室 燃燒方式을 應用하면 本 研究

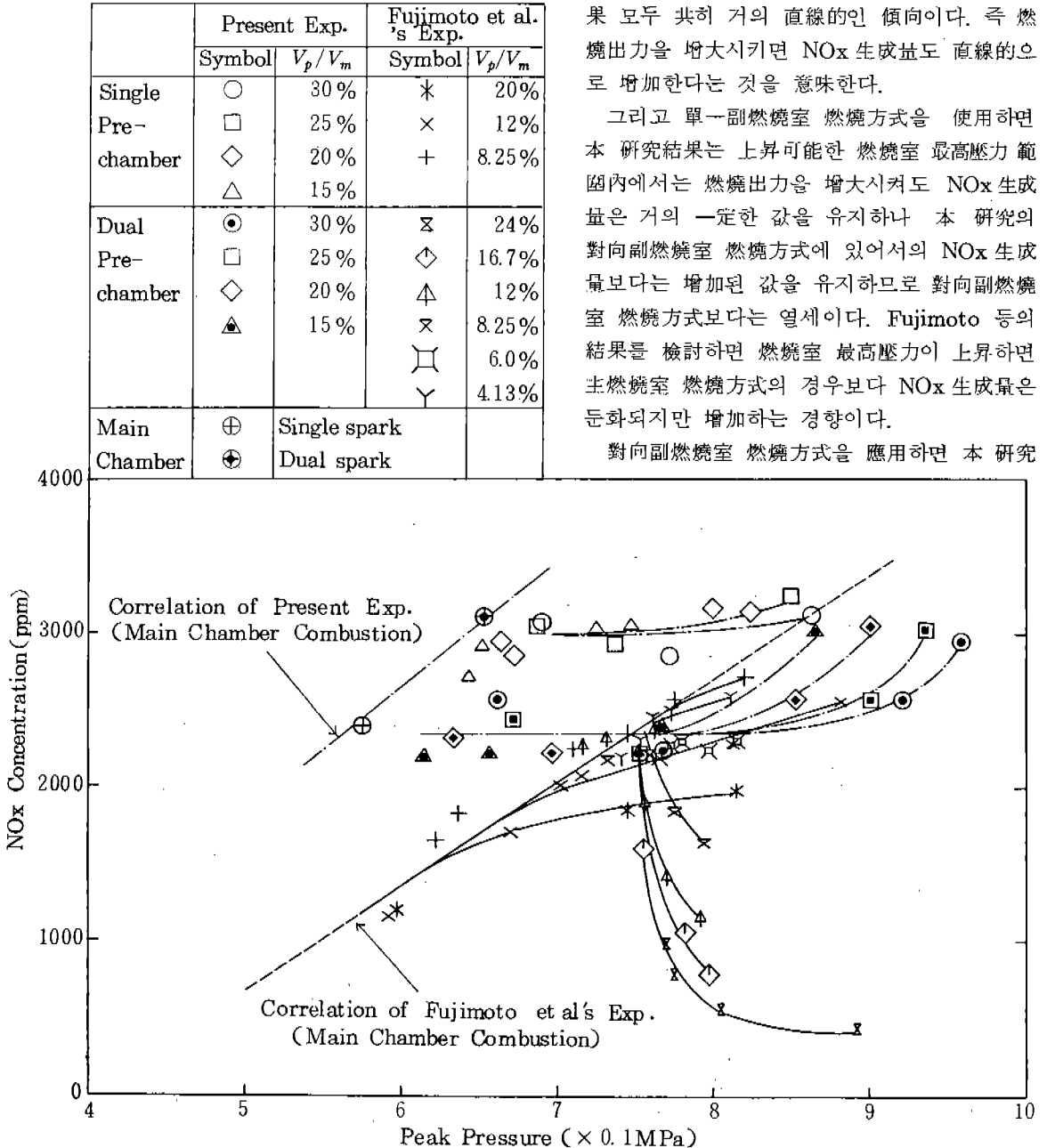


Fig.10 Relationship between NO<sub>x</sub> Concentration of Burned Gas and Combustion Chamber Peak Pressure



에 있어서는 燃燒室 最高壓力을 上昇시키면 極히 上昇된 壓力 範圍에서는 增加하는 傾向이 있으나 대체적으로 燃燒出力에 대하여 NO<sub>x</sub> 生成量은 比較의 一定한 값을 유지하고 있다. 그리고 이때의 NO<sub>x</sub> 生成量은 항상 單一副燃燒室 燃燒方式의 경우보다 低下된 값을 指示하고 있다. 이에 反하여 Fujimoto 등의 結果는 參考文獻(15)에서 言及한 바와 같이 一般의인 說明은 不可能하나 燃燒出力을 增加시켜도 NO<sub>x</sub> 生成量은 逆으로 減少하고 있다. 이 結果에 대한 本 研究와 Fujimoto 등의 현저한 差異는 實驗에서 採擇한 燃燒室形狀이 주된 原因중의 한 가지일 것으로 推測된다.

本 研究에 있어서나 Fujimoto 등의 結果에 있어서나 燃燒出力을 上昇시키면서도 NO<sub>x</sub> 生成量을 一定量으로 유지하거나 오히려 低下시킬 수 있는 것은 크게 두 가지 과정으로 이해될 수 있을 것이다. 첫째, 對向噴出焰 燃燒方式에 있어서는 副燃燒室로부터 噴出하는 高速의 噴出焰 先端의 剪斷層 流動에 의하여 流入되는 미연가스에 의한 局部的인 燃燒溫度 降下效果와 둘째, 高速噴出火焰의 流動의 亂流化에 따른 정체시간(residence time) 短縮效果이다. 그러나 아직은 두 가지 效果가 完全한 說明을 分離하여 表現될 수 없으므로 1984年 20次 國際燃燒學會에서 言及된 바 있었던, 對向噴出焰의 층들에 의한 混合過程이 기연가스와 미연가스와의 混合을 유도하여 소위 燃燒室 內部 排氣가스 再循環(Internal exhaust gas recirculation) 效果라고 지칭하기로 한다.

따라서 本 研究의 結果와 Fujimoto 등의 結果로부터 對向噴出焰 燃燒方式을 應用하면 燃燒出力을 상당한 範圍內에서 增大 可能하며 이 경우에도 NO<sub>x</sub> 排出량은 一定量 水準 以下로 유지시킬 수 있어 궁극적으로 NO<sub>x</sub>의 부가적인 증가없이 機關出力의 향상을 유출할 수 있는 方案이 될 수 있다.

#### 4. 結 論

프로판-공기에 혼합기를 定積燃燒室에서 主燃燒室 燃燒方式 및 單一副燃燒室 燃燒方式,

對向副燃燒室 燃燒方式으로 燃燒의 方式을 變更하며 燃燒室 最高壓力과 NO<sub>x</sub> 排出物량과의 關係를 調査하여 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) 對向副燃燒室 燃燒方式(혹은 對向噴出焰 燃燒方式)을 採擇하면 他燃燒方式보다도 燃燒室 最高壓力을 最大限 上昇시켜 燃燒效率을 增大시키면서도 NO<sub>x</sub> 生成량은 더 낮은 水準에서 유지시킬 수 있어, 燃燒效率 上昇과 NO<sub>x</sub> 生成抑制의 二重效果가 있다.

(2) 이 現象은 特性變數  $A_{ori}/V_p$ 가  $A_{ori}/V_p]_c = 5 \times 10^{-3}/cm$  이하에서 뚜렷한 傾向을 나타내고 있다.

(3) 以上の 現象은 소위 燃燒室 內部 排氣가스 再循環效果에 기인한 것으로 지목된다.

(4) 장래의 차후 研究方向으로 燃燒室 內部 排氣가스 再循環效果를 確認할 수 있는 方案으로서 局部溫度變動, 速度變動 및 이의 相關關係에 관한 지속적인 研究가 要請된다.

#### 後 記

本 論文은 1986年度 文教部 自由課題 學術 研究助成費의 支援에 의하여 수행되었으며 이에 심심한 謝意를 表한다.

#### 參 考 文 獻

1. Zeldovich, Ya. B., Sadovnikov, P. Ya. and Frank-Kamenetskii, D.A.; "Oxidation of Nitrogen in Combustion," (transl. by M. Shelef) Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.
2. Westenberg, A.A.; "Kinetics of NO and CO in Lean, Premixed Hydrocarbon-Air Flames," Combust. Sci. Technol., 4,59,1971.
3. Chigier, N.; "Energy, Combustion and Environment," McGraw-Hill, Inc., p.336, 1981.
4. Bowman, C.T.; "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," Combust. Sci. Technol., 4,1,1971.

- tion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1,33, 1976.
5. Edwards, J. B.; "Combustion - The Formation and Emission of Trace Species," Ann Arbor Science Publishers, Inc., p.49,1974.
  6. Blumberg, P. and Kummer, J.T.; "Prediction of NO Formation in Spark Ignited Engines - An Analysis of Control Methods," *Combust. Sci. Technol.*, 4,73, 1971.
  7. Lefebvre, A.H.; "Pollution control in Continuous Combustion Engines," 15th Symp. (Intl.) on Combustion, 1169, 1975.
  8. 조경국, 정인석, 정경석; "분할 연소실내의 대향 분출화염의 연소특성에 관한 연구", 한국자동차공학회지 제 9권 제 4호, 50,1987.
  9. Leyer, J.C. and Manson, N.; "Development of Vibratory Flame Propagation in Short Closed Tubes and Vessels," 13th Symp. (Intl.) on Combustion, 551,1971.
  10. Dunn-Rankin, D. and Sawyer, R.F.; "LDA Study of the Unburned Gas Motion Induced by Nonsteady Flame Propagation in a Constant Volume Duct," Lawrence Berkley Laboratory Rep., LBL-19165, 1985.
  11. Wakai, K., Shimizu, S., Hibino, Y. and Tanaka, C.; "The Mechanism of Wedge Shaped Flame Formation in a Closed Vessel," *JSME-B part*, vol.53-488,1433, 1987.
  12. Glassman, I.; "Combustion," Academic Press, p.15,1977.
  13. Heywood, J.B.; "Pollutant Formation and Control in Spark-Ignition Engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1,135,1976.
  14. Klomp, E.D. and Deboy, G.R.; "The Effects of Fluid Motions on Combustion in a Prechamber Bomb" SAE Technical Paper Series 760162,1976.
  15. Fujimoto, S., Kaneko, Y. and Tsumo, S.; "Possibility of Low-NOx and high-Load Combustion in Premixed Gases," 20th Symp. (Intl.) on Combustion,61, 1984.