

<論 文>

물添加가 豫混合火焰의 燃燒效率에 미치는 影響

金 聖 煥\* · 吳 信 奎\* · 蔡 載 宇\*\*

(1987年 6月 1日 接受)

The Effect of Water Addition on Combustion Efficiency in Premixed Flame

Sung Hwan Kim, Shin Kyu Oh and Jae Ou Chae

Key Words: Combustion Efficiency(燃燒效率), Premixed Flame(豫混合 火焰), Equivalence Ratio(當量比), Fuel Lean Region(燃料稀薄領域), Fuel Rich Region(燃料過剩領域), Micro-Explosion(微細爆發)

Abstract

The purpose of the present investigation is to examine the effect of water addition on combustion efficiency. In this research, fuel and additive water are injected into a burner in the form of vapors through separate needle valves, the flame temperature and concentrations of soot, CO and unburned hydrocarbons were measured in a premixed flame. The results are obtained to be: In the fuel lean region, the reduction rate of CO, soot and HC by water injection increases slightly, but there is no change in the combustion efficiency. On the other hand, in the fuel rich region, the reduction rate of CO, Soot and HC by water injection increases more than that of the fuel lean region. Accordingly, combustion efficiency increases.

記 號 說 明

$C_s$  : Soot 濃度(g/Nm<sup>3</sup>)

$L$  : 軸方向 距離(mm)

$\eta_c$  : 燃燒效率

$\phi$  : 當量比

1. 序 論

化石燃料의 枯渴로 인하여 世界各國은 代替에너지의 開發과 既存에너지의 效率의인 利用方法에 큰 關心을

두게 되었다. 既存에너지의 效率의인 利用方法으로는 揮發性이 낮은 低級 燃料의 使用이 있으나, 이런 低級 燃料은 燃燒時 大氣를 汚染시키는 物質을 排出하게 된다. 이러한 汚染物質을 抑制시키기 위하여 물添加나 金屬添加等의 方法이 研究되어져 왔으며<sup>(1-3)</sup>, 그중에서도 燃燒時에 물을 添加시켜 汚染物質을 抑制하는 方法은 물의 物理的 效果와 化學的 效果에 重點을 두고 研究되고 있다<sup>(1,2,4)</sup>.

Stögren<sup>(1)</sup> 등은 물과 燃料을 emulsion 狀態로 燃燒시켰을 때 물을 添加시킴에 따라 오일 코크의 크기는 30~50 $\mu$ m에서 1~5 $\mu$ m로 작아지고, soot의 排出量은 90% 程度까지 減少되는 結果를 얻었다.

\* 仁荷大學校 大學院

\*\* 正會員, 仁荷大學校 工科學 機械工學科

Greeves<sup>(2)</sup> 등은 디젤기관에 물을 噴射하였을때 물을 噴射시킨 境遇가 燃料만을 噴射시켰을 境遇보다 NO는 約 70%, CO와 soot는 約 50% 감소되는 結果를 얻었다. 그러나 물/연료 體積比가 0.6을 超過하면 HC가 增加하기 때문에 물/연료體積比는 0.6以下가 適合하였다. 이와같이 汚染物質을 抑制하기 위해 물을 添加하였지만, 물添加가 燃燒狀態에 어떠한 影響을 미치는가에 대한 研究는 微弱한 實情이다.

따라서 本 研究는 霧混合火焰에 물을 添加하였을 때의 물/연료 體積比에 따른 火焰溫度, 不完全가스濃度(CO, THC, H<sub>2</sub>), soot 濃度를 測定하여 물이 燃燒效率에 미치는 影響을 考察하고자 한다.

2. 理論的 考察

2.1 물의 效果

(1) 化學的 效果

燃燒時 물은



의 反應에 의하여 OH 基를 生成하고, 生成된 OH 基는  $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$  (4)

의 反應을 促進시켜 CO의 量을 抑制한다<sup>(4,5)</sup>.

또한 물의 化學的 反應으로 生成된 OH 基가 soot precursor를 抑制시키면서 속중합 反應과 炭素核의 生成을 抑制하기 때문에 Soot의 量은 줄어든다<sup>(6,7)</sup>.

(2) 物理的 效果

물과 함께 噴射된 燃料의 液滴은 그 속에 물 液滴을 包含하게 되고 이 물 液滴이 가열되어 터지게 되면 燃料의 液滴도 역시 터져 分散하게 된다. 이 現象을 微細爆發 혹은 2次 微粒化라고 한다. 이때, 微粒화된 燃料은 空氣와의 接觸面積이 增大되어 燃燒狀態를 向上시키기 때문에 CO와 soot의 量을 抑制시킨다<sup>(2)</sup>. 그런데 물/연료 體積比가 작을 때는 微細爆發의 影響이 크나 물이 增加할수록 微細爆發보다는 空氣와의 混合運動量의 影響이 크다<sup>(2)</sup>.

2.2 燃燒效率의 定義<sup>(8,9)</sup>

燃燒效率은 다음과 같이 表示된다.

$$\eta_c = \frac{H_c - L_c - L_i}{H_c} = \frac{H_c - L_i}{H_c} \quad (5)$$

여기서, H<sub>c</sub> : 燃料의 低發熱量[kcal/kg]

L<sub>c</sub> : Ash에 의한 損失量[kcal/kg]

L<sub>i</sub> : 不完全 燃燒損失量[kcal/kg]

을 뜻한다.

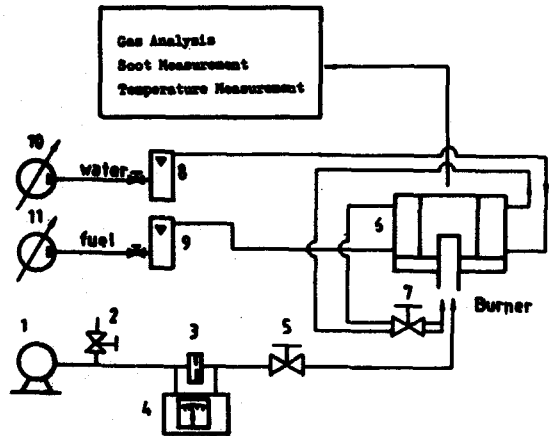
3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置

本 研究에서 使用한 實驗裝置의 概略圖는 Fig. 1과 같으며 火焰을 發生시키는 버어너와 溫度, soot 및 排出가스濃度를 測定할 수 있는 裝置로 構成되어 있다.

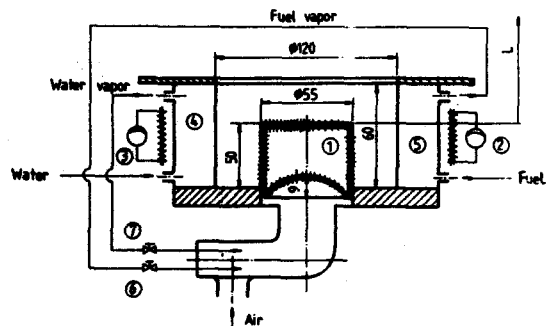
(1) 버어너

버어너는 霧混合火焰을 發生하는 裝置로써, Fig. 2



1. Blower, 2. By-pass valve, 3. Orifice, 4. Micro-manometer, 5. Main valve, 6. Evaporator, 7. Needle valve(water, oil), 8. Water flow meter, 9. Oil flow meter, 10. Water pump, 11. Oil pump

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



1. Flame holder, 2. Fuel preheater, 3. Water preheater, 4. Water evaporator, 5. Fuel evaporator, 6. Fuel needle valve, 7. Water needle valve

Fig. 2 Schematic diagram of burner

에 표시된 것과 같이 물과 연료(石油)를 각각 분사하는 2개의 니들밸브 ⑥, ⑦와 물과 연료를 각각 기화시켜 주는 2개의 기화기 ④, ⑤, 그리고 연소용 공기를 공급하는 송풍기와 화염을 유지해 주는 홀더 ①로 되어 있다. 연료를 분사하는 연료용 니들밸브 ⑥은 직徑이 1.8mm이고, 물을 분사하는 물용 needle 밸브 ⑦은 직徑이 1.6mm로 되어 있다. 연료와 물은 각각 펌프에 의해 기화기 ⑤로流入된다. 기화기는 가열기 ②로 예열시키며 연료와 물을 기화시키고, 기화된 물과 연료는 니들밸브를 통해 고속으로 분사되어 홀더 ①에서 공기와 혼합된다. 홀더 ①은 耐熱鋼을 圓筒形으로 만든 다음 上面과 侧面에 직徑이 1.0mm인 구멍을 2mm 간격으로 뚫은 것이다. 그리고 물과 연료는 각각의 펌프 ⑩, ⑪에 의해 공급되며 밸브에 의해 조절된 물과 연료의 流量은 流量計(float type)로 測定하였고 空氣의 流量은 KS規格에 따라 오리피스를 設置하여 마노메타로 測定하였다.

(2) Soot 濃度 測定裝置

Soot 濃度 測定裝置는 soot를 捕集하는 soot 捕集器와 燃焼가스量을 測定하는 裝置로 構成되어 있다. soot 捕集器는 Fig. 3에 나타나 있다. 窒素-燃焼가스 混合氣의 量은 가스미터로 測定하였다.

(3) 溫度 測定裝置

溫度 測定裝置는 직徑이 300 $\mu$ m인 CA 熱電對를 支

持하는 프로우브(Fig. 4)와 溫度를 感知하여 記錄하는 data-logger로 構成되어 있다.

3.2 實驗方法

Fig. 2에서 表示된 바와 같이 프레임홀더의 上端을 基準으로 하여 軸方向 距離에 따라  $L=20\text{mm}$ ,  $200\text{mm}$ ,  $450\text{mm}$ (以下  $L=20\text{mm}$ ,  $L=200\text{mm}$ ,  $L=450\text{mm}$ 로 明記)의 位置에서 火焰溫度, CO, THC,  $H_2$ , 및 soot 濃度를 測定하였다. 또 물/연료 體積比는 0에서 0.5까지 변화시켰으며, 當量比  $\phi=1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.9$  등으로 변화시켰다.

(1) Soot 濃度 測定

本 實驗에서 使用한 直接捕集方式은 燃焼가스를 捕集器로 吸入한 후 필터를 通過시키면 soot는 필터에 걸리고 氣體成分만 통과하는 方法으로서 Fig. 5에 나타나 있다. 이에 필터에 걸린 soot의 무게와 통과한 燃焼가스의 量을 알면 soot의 重量濃度를 求할 수 있다.

$$C_s = \frac{\text{포집된 soot의 무게 (g/Nm}^3\text{)}}{\text{흡입된 연소가스량}}$$

Soot의 무게는  $10^{-4}$ g의 精密度를 갖는 저울(Shimadzu L-160)로 測定하였다.

(2) 가스 濃度 測定

排出가스는 不完全 燃焼가스인 CO,  $H_2$ , HC( $CH_4$ ,

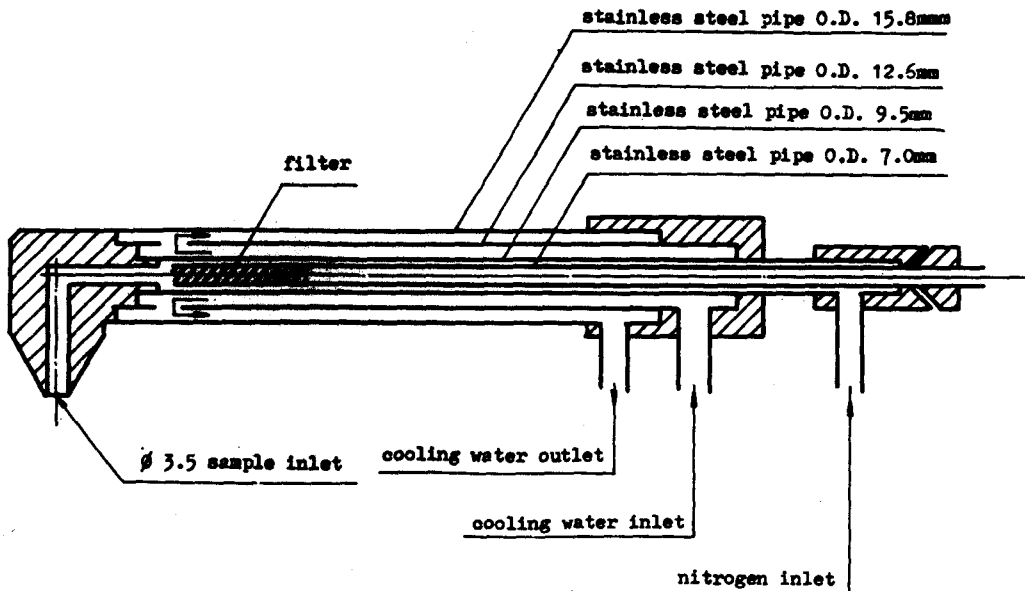


Fig. 3 Soot sampling probe

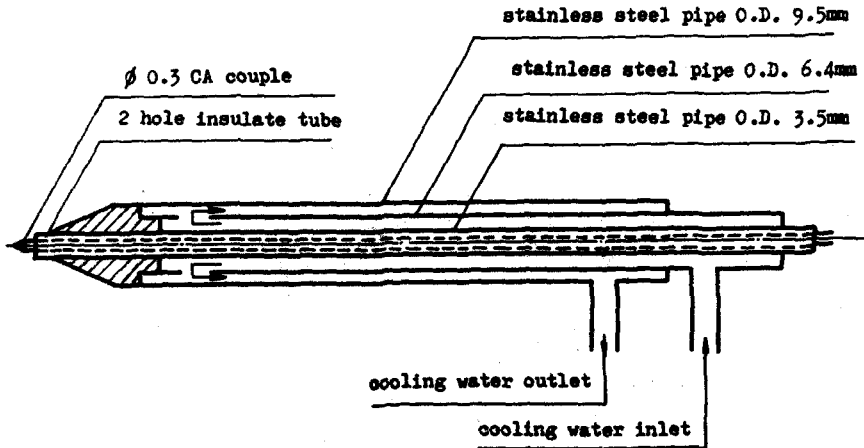


Fig. 4 Temperature probe

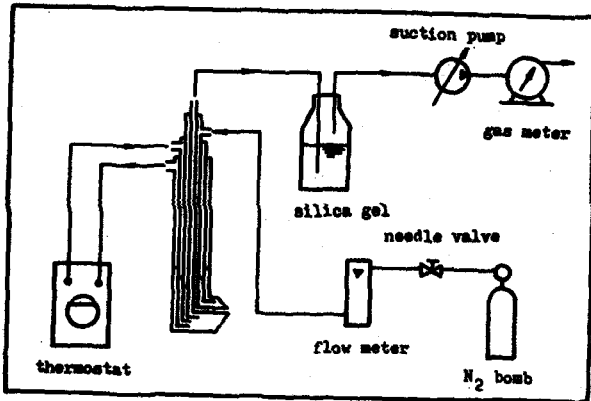


Fig. 5 Soot sampling flow system

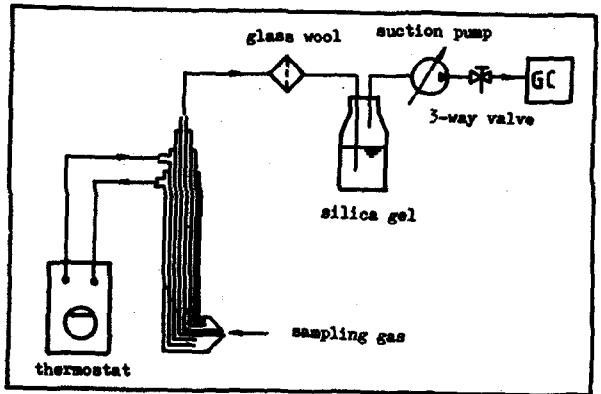


Fig. 6 Gas sampling flow system

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 등의 濃度를 測定하였다. Fig. 6과 같이 恒溫槽를 使用하여 冷却水 溫度를 一定하게 維持시켰고 試料가스는 샘플링프로브와 유리섬유 및 실리카겔을 거쳐 眞空펌프로 gas chromatograph 內에 流入시켜 分析하였다. gas chromatograph의 운전 조건은 Table 1과 같다.

4. 實驗結果 및 考察

本 實驗裝置에 의해 形成된 火焰은 원뿔형의 holder (Fig. 2 참조) 表面에 평행한 3~4mm 두께의 푸른색 화염 및 일관적으로 불수 있는 cone 형상의 주황색 화염 형태를 갖는다.

4.1 溫度分布

Fig. 7은 L=20mm에서  $\phi=1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.9$  등

Table 1 Operating conditions of gas chromatograph

Detecting gas	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Column material	MS 13× (30/60 mesh)	MS 5A (30/60 mesh)	Activated Alumina (60/80 mesh)
Carrier gas	He	N <sub>2</sub>	He
Column size	$\phi 3 \times 2000$	$\phi 3 \times 2000$	$\phi 3 \times 1500$
Detector	TCD	TCD	FID

으로 變化시켰을 境에 물/연료體積比에 따른 火焰 溫度의 變化를 나타낸 것이다.  $\phi=0.9$ 인 燃料稀薄領域과  $\phi=1.0$ 인 領域에서는 물/연료體積比가 0.1~0.3

로 나타났기 때문에 本 研究에서는  $\phi$ 와 물量에 따른 最高溫度만을 표시하였다.

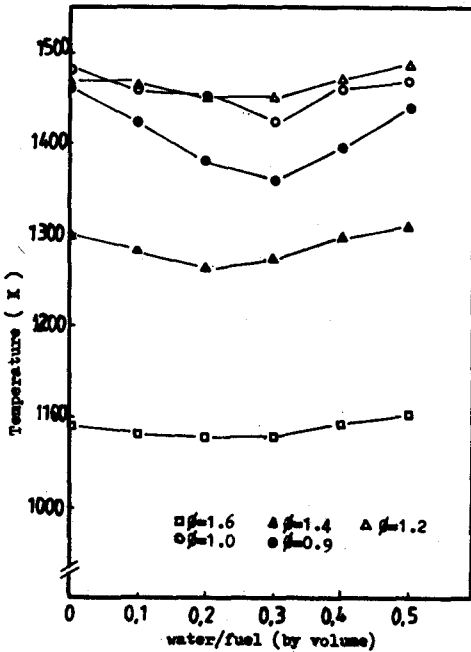


Fig. 7 The effect of water on temperature with various equivalence ratio at  $L=20\text{mm}$

까지는 溫度가 下落하였고, 0.4에서 溫度가 上昇하여 0.5일때의 溫度가 물添加를 하지 않을 때의 溫度와 비슷하였다. 그러나  $\phi=1.2, 1.4, 1.6$ 인 燃料過剩 領域에서는 물/연료體積比가 0.1~0.3까지는 溫度가 약간 떨어지다가 0.4에서 溫度가 上昇하여, 0.5에서 물을 添加하지 않을 때의 溫度보다 약간 上昇하였다. 그 理由는 燃料의 量에 비하여 물의 量이 매우 적은 境遇에는 물의 微細爆發에 의한 影響으로 空氣와의 接觸面積이 增大되어 燃燒가 活發히 일어나지만 물의 量을 增加시킬수록 微細爆發은 微弱해지고 流入되는 空氣流動의 變化와 混合運動量의 影響이 커지며 물의 化學的 效果에 의한 化學的에너지가 熱에너지로 轉換된다고 생각된다.

그러므로 물/연료體積比가 0.1~0.3까지는 물의 微細爆發로 생긴 熱이 물에 의하여 損失되는 熱보다 작아서 火焰溫度는 떨어지나 0.4~0.5에서는 물의 化學的 效果와 混合運動量의 影響이 물에 의한 熱損失을 超過하여서 溫度가 上昇한다고 생각된다.

예비실험을 통하여  $L=20\text{mm}$ 에서 火焰溫度가 最高

#### 4.2 不完全 燃燒가스( $\text{H}_2, \text{CO}, \text{THC}$ ) 및 Soot 濃度分布

Fig. 8은  $L=20\text{mm}$ 에서 當量比와 물/연료體積比에 따른  $\text{H}_2$ 의 濃度를 나타낸 것이다. 물添加에 따른  $\text{H}_2$  濃度變化는 緩慢하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 各各  $L=200\text{mm}, L=450\text{mm}$ 에서 當量比와 물/연료體積比에 따른  $\text{H}_2$  濃度를 나타낸 것으로 Fig. 8과 비슷한 傾向을 보인다.

Fig. 11은  $L=20\text{mm}$ 에서 當量比와 물/연료 體積比에 따른  $\text{CO}$  濃度를 表示한 것이다. 물添加에 따른  $\text{CO}$  濃度는 減少되었고, 물/연료體積比가 0.4~0.5에서 減少效果가 더욱 더 顯著하였으며, 특히 0.5에서 減少效果가 가장 크다.

물添加에 따른  $\text{CO}$ 의 減少는 물/연료體積比가 0.1~0.3일때는 물의 微細爆發에 의하여 減少되고, 0.4以上일때는 混合運動量의 增加와 물의 化學的 效果로  $\text{CO}$ 의 濃度가 減少된 것으로 생각한다.

Fig. 12와 Fig. 13은 各各  $L=200\text{mm}, L=450\text{mm}$ 에서 當量比와 물/연료體積比에 따른  $\text{CO}$  濃度를 나타

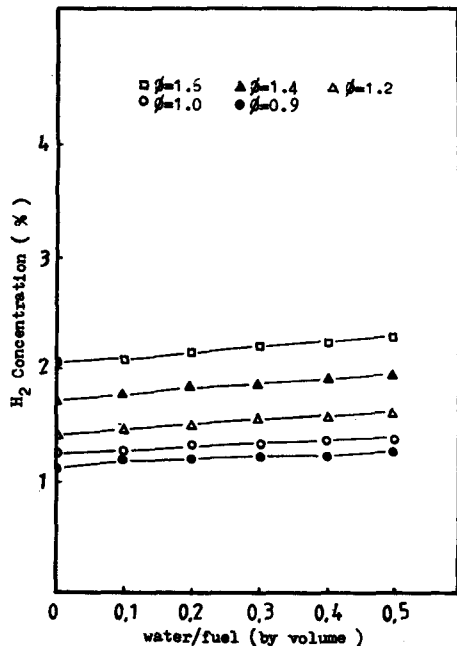


Fig. 8 The effect of water on  $\text{H}_2$  concentration with various equivalence ratio at  $L=20\text{mm}$

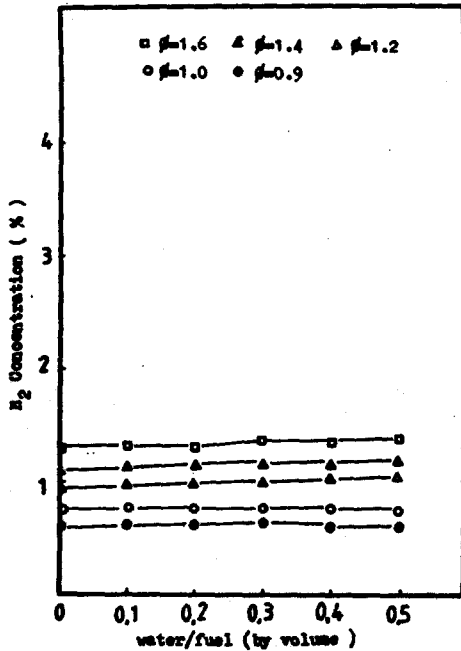


Fig. 9 The effect of water on H<sub>2</sub> Concentration with various equivalence ratio at L=200mm

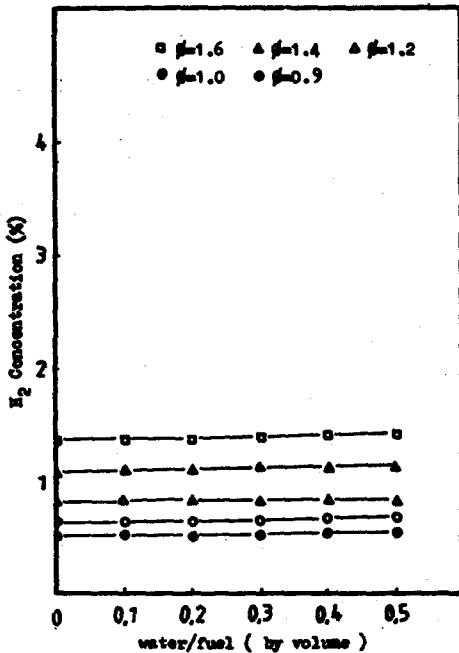


Fig. 10 The effect of water on H<sub>2</sub> concentration with various equivalence ratio at L=450mm

낸 것으로 Fig. 11과 비슷한 傾向을 보였다.

排氣領域(L=450mm)의 CO濃도는 燃料稀薄 領域과 當量비가 1.0인 領域에서는 물을 添加하지 않아도 15PPM 이하로 되므로 물 添加에 따른 CO의 減少量은 極히 微弱하나, 燃料過剩 領域에서의 물 添加에 따른 CO의 最大 減少量은  $\phi=1.2$ 일때 1.8%이고,  $\phi=1.4$ 일때 2.4%이고,  $\phi=1.6$ 일때 2.8%이다.

Fig. 14는 HC(CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>)를 各各 分析하여 이들의 값을 合計한 값인 THC(total hydrocarbon)를 軸方向距離에 따라 表示한 것이다.

THC는 낮은 溫度에서도 熱分解되어 生成될 수 있는 것으로 그 濃度는 不完全 燃焼가스 中에서 가장 적은 濃度를 갖는다. THC도 물 添加에 따라 減少하며, 물 연료體積비가 0.5일때 減少效果가 가장 크다. Fig. 15와 Fig. 16은 各各 L=20mm, L=450mm에서  $\phi$ 와 물/연료體積比에 따른 THC 濃度를 나타낸 것으로 Fig. 14와 비슷한 傾向을 보인다.  $\phi=1.6$ 에서도 排氣 領域의 THC 濃度는 20PPM 미만으로 燃焼效率에 미치는 影響은 거의 없다.

Fig. 17은 soot 濃度를  $\phi=1.6$ 에서 軸方向距離에 따른 變化를 나타낸 것이다. 1회 포집시 soot의 질량 차이는 최대  $5 \times 10^{-5}g$  정도(총 soot 무게의 9% 미만)

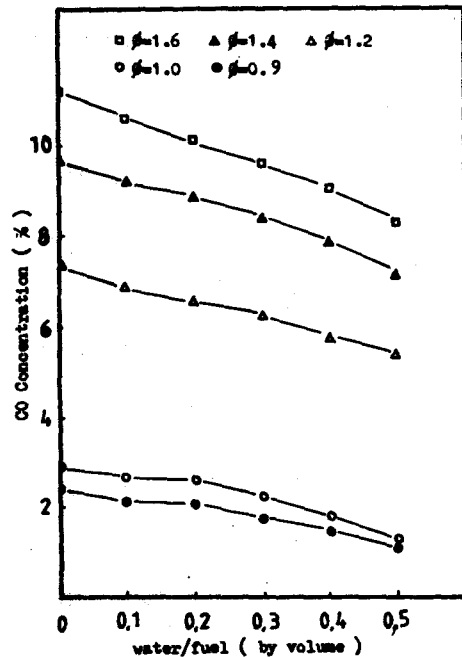


Fig. 11 The effect of water on CO concentration with various equivalence ratio at L=20mm

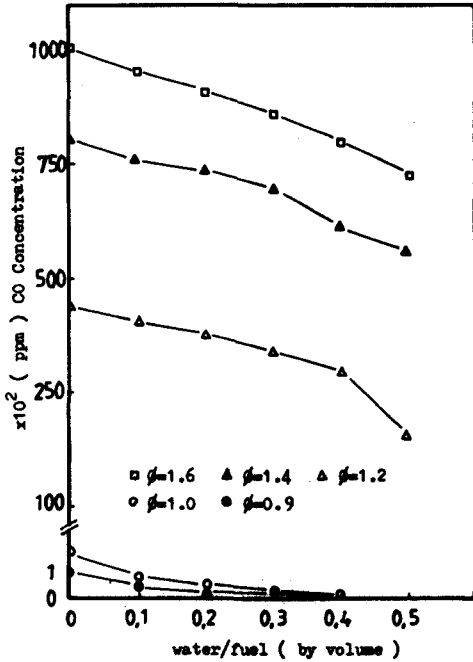


Fig. 12 The effect of water on CO concentration with various equivalence ratio at  $L=200\text{mm}$

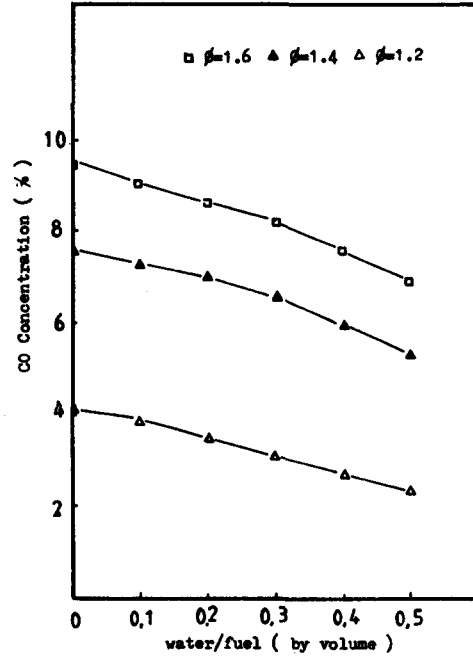


Fig. 13 The effect of water on CO concentration with various equivalence ratio at  $L=450\text{mm}$

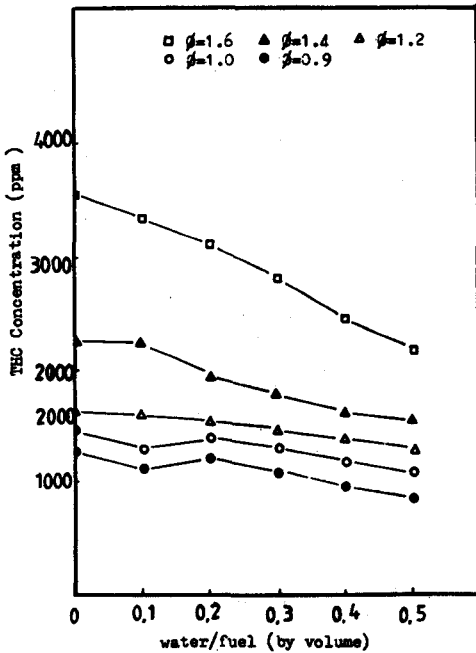


Fig. 14 The effect of water on THC concentration with various equivalence ratio at  $L=20\text{mm}$

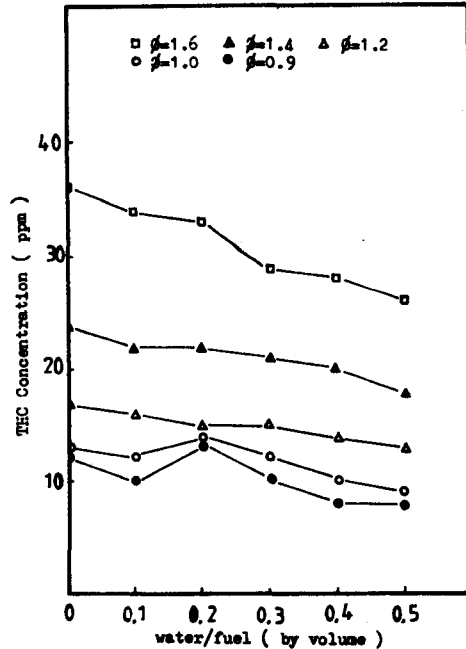


Fig. 15 The effect of water on THC concentration with various equivalence ratio at  $L=200\text{mm}$

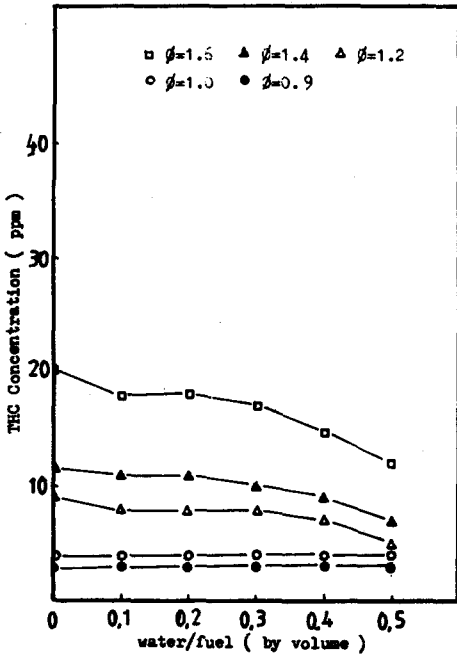


Fig. 16 The effect of water on THC concentration with various equivalence ratio at  $L=450\text{mm}$

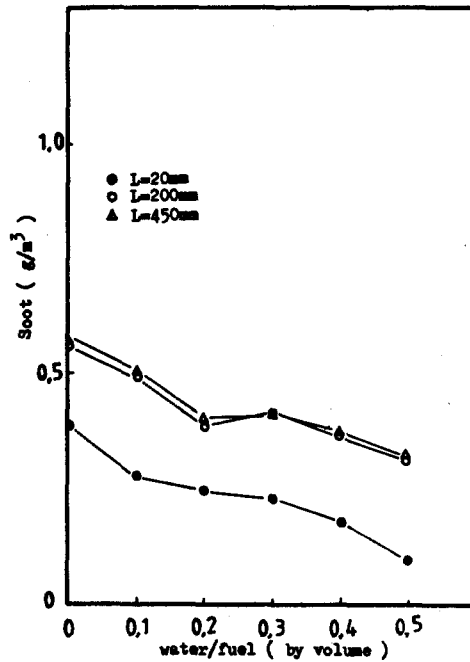


Fig. 17 The effect of water on soot concentration along the axial length above flame holder at  $\phi=1.6$

이었다. Soot 濃度도 물添加에 따라 減少效果가 물/연료體積比가 0.5 일때 減少效果가 가장 컸다. 그 理由는 soot에 대한 물의 效果에서 說明하였듯이 물을 添加함으로써 OH 基의 量이 增加하여, OH 基가 soot의 precursor를 抑制시키고 縮중합반응과 탁소력의 生成을 抑制하기 때문에 soot가 減少되는 것으로 생각된다.

當量比와 물/연료體積比에 따른 濃度변화에 대해서 不完全 燃燒가스中 CO의 濃度變化가 가장 크게 변화되어, 燃燒效率에 가장 크게 影響을 미쳤다.

### 4.3 燃燒效率의 變化

Fig. 18은 排氣領域( $L=450\text{mm}$ )에서 當量比와 물/연료體積比에 따른 燃燒效率을 나타낸 것이다.

$\phi=1.0, 0.9$ 에서는 물添加로 인하여 燃燒效率의 變化는 없지만,  $L=20\text{mm}$ 에서는 물添加가 不完全 燃燒가스를 減少시켜 結局 燃燒狀態를 촉진시켰고,  $\phi=1.2, 1.4, 1.6$ 에서는 물添加로 인하여 燃燒效率이 增加하였다. 當量比가 높을수록 물/연료體積比가 높을수록 燃燒效率의 增加가 크다.

燃燒效率의 最大增加値는  $\phi=1.2$ 에서는 5.6% 이고  $\phi=1.4$ 에서는 6.7% 이고,  $\phi=1.6$ 에서는 7.1% 이다.

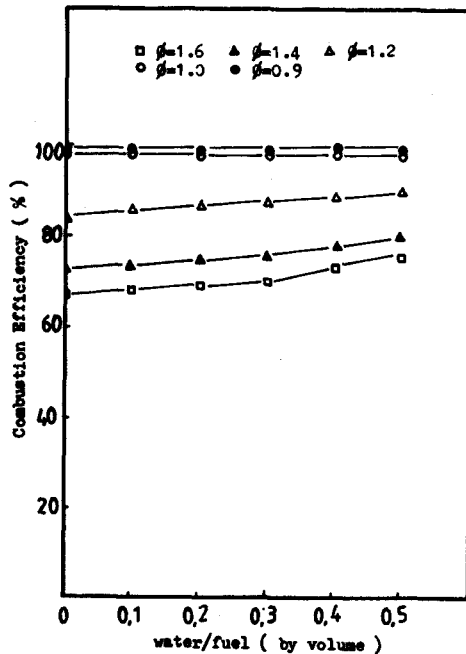


Fig. 18 The effect of water on combustion efficiency with various equivalence ratio at  $L=450\text{mm}$



## 5. 結 論

本 研究는 豫混合火焰에서 물/연료體積比에 따른 火焰溫度, 不完全가스( $H_2$ , CO, HC) 濃度 및 soot 濃度を 當量比와 軸方向距離에 따라 測定하여 물이 燃燒效率에 미치는 影響을 考察하였으며 그 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 火焰의 最高溫度는 물/연료體積比를 증가 시킴에 따라 낮아지다가 물/연료體積比가 0.4 이상에서는 증가하였다.

(2) 不完全가스中 燃燒效率에 가장 크게 影響을 미친 가스는 CO 이고, CO 와 THC 濃度는 물/연료體積比가 增加할수록 크게 감소하나,  $H_2$  농도는 물/연료 체적비에 따른 변화가 완만하다.

(3) Soot 의 濃度는 물/연료 體積比에 增加에 따른 減少效果가 현저하게 나타났다.

(4) 燃燒效率은 연료회박영역에서는 물/연료 체적비의 증가에 따라 변화 되지 않지만, 연료과잉영역에서는 물/연료 체적비의 증가에 따라 크게 증가 하였다.

## 參 考 文 獻

- (1) Stögren, A., 1976, "Burning of Water-in-Oil Emulsions", 16th Symposium(International) on Combustion, Combustion Institute, pp. 297~305.
- (2) Greeves, C., et al., 1976, "Effect of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emission", 16th Symposium(International) on Combustion, Combustion Institute, pp. 321~335.
- (3) B.S. Haynes, et al., "The Influence of Gaseous Additives on the Formation of Soot in Premixed Flames", 19th Symposium(International) on Combustion, Combustion Institute, pp. 1379~1385.
- (4) Dryer, F.L., 1976, "Water Addition to Practical Combustion System", 16th Symposium(International) on Combustion, Combustion Institute, pp. 279~295.
- (5) Vandooren, J., et al., 1974, "Rate Constant of the Elementary Reaction of Carbon Monoxide with Hydroxyl Radical", 15th Symposium(International) on Combustion, pp. 745~754.
- (6) Takahashi, F., et al., 1984, "Sooting Correlations for Premixed Flames", Combustion Sci., and Tech., Vol. 37, pp. 1~19.
- (7) Rao, V.K., et al., 1984, "The Effect of Water on Gas Phase Soot Formation in Laminar Diffusion Flames", Combustion and Flame, Combustion Institute, pp. 73~78.
- (8) 水谷辛夫, 1977, "燃燒工學", 森北出版, pp. 22~66.
- (9) 吉田高年, 1976, "燃燒工學", 共立出版, pp. 14~70.