

# CI 機關에 있어서 세라믹 필터트랩에 관한 研究

A Study on the Ceramic Filter Trap in CI Engine

韓 英 出\*, 柳 晷 浩\*\*  
Y. C. Han, J. H. Yoo

## ABSTRACT

This study is a theoretical analysis and experimental effect of oxygen concentration, exhaust velocity and trap inlet temperature on particulate ignition temperature with installation of ceramic filter trap in diesel engine. So the following results are obtained.

1. Based on the fundamental experiments of the regeneration process, the analytical model was developed and the results from the analytical model agreed with the experiments, then the validity of the model was proved.
2. The ignition temperature for accumulated particulate was proportional to the exhaust velocity and it was known that the optimum exhaust velocity was about 15m/sec.
3. The ignition temperature for accumulated particulate was inversely proportional to the oxygen concentration and the trap inlet temperature, and a minimum oxygen concentration of 5% was required to sustain regeneration.
4. This experimental filter trap(EX-66) is found about 30% of smoke reduction efficiency in comparison with existing muffler.

	기 호 설 명	:	$\Delta H$	Enthalpy of carbon oxidation. (cal/gmol)
$C_p$	: Heat capacity of the gas. (cal/g °k)	$k$	:	Reaction rate constant. (cm/s)
$C_{ps}$	: Heat capacity of the soot. (cal/g °k)	$k_0$	:	Pre-exponential factor. (cm/s)
$D$	: Diameter of cells. (cm)	$L$	:	Length of ceramic filter trap. (cm)
$E$	: Internal energy in reaction chamber. (J)	$\Delta P$	:	Pressure drop. (N/m <sup>2</sup> )
$E_r$	: Activation energy for the oxidation reaction. (cal/gmol °k)	$R$	:	Ideal gas constant. (cal/gmol °k)
$h$	: Convective heat transfer coefficient. (cal/cm <sup>2</sup> °k·s)	$s$	:	Specific surface area of the soot. (cm <sup>-1</sup> )
		$T$	:	Average rate of carbon oxidation. (g/cm <sup>2</sup> s)

\* 正會員, 國民大學校 機械工學科

\*\* 國民大學校 大學院 機械工學科

- $T_{ign}$  : Ignition temperature. ( $^{\circ}k$ )
- $T_{in}$  : Inlet temperature. ( $^{\circ}k$ )
- $U$  : Exhaust gas velocity. (cm/s)
- $W$  : Soot layer thickness. (cm)
- $x$  : Depth direction in the thin particulate layer. (cm)
- $\beta$  : Heating rate. ( $^{\circ}k/s$ )
- $\epsilon$  : Void fraction of the particulate layer
- $\rho$  : Gas density. ( $g/cm^3$ )
- $\rho_s$  : Soot density. ( $g/cm^3$ )
- $\psi_{O_2}$  : The oxygen concentration of the exhaust gas. (mol)

## 1. 序 論

急速한 産業化가 이루어짐에 따라 産業公害가 深刻한 社會問題로 대두되고 있으며 특히 大都市 大氣汚染의 主要原因이 되는 自動車 排出가스의 問題는 날로 그 深刻度가 더해가고 있다. 특히 가솔린 차량에 대해서는 1987年 7月 1日부터 美國과 같은 水準으로 新規車輛에 대하여 實施하고 있으나 全體 車輛의 50% 以上인 디젤 自動車에서 가장 問題視되고 있는 煤煙은 現在의 水準을 그대로 維持하고 있어 이에 대하여 時急한 煤煙低減對策이 要求되고 있는 實情이다.

煤煙低減對策은 크게 세가지로 區分할 수 있다. 첫째 機關改良, 둘째 燃料改良, 셋째 排氣後處理方法<sup>1)</sup> 등이 있다. 이중 앞의 두 방법은 그 規制의 限界가 있으므로 後處理에 의한 方法의 研究가 가장 활발히 이루어지고 있다.

지금까지 많은 研究가 遂行되어 實用化 段階에 있거나 앞으로 實用化 可能性이 가장 높은 煤煙여과裝置로는 세라믹濾過裝置<sup>2)</sup>(Ceramic monolith trap) 觸媒濾過裝置(CTO: Catalytic Trap Oxidizer) 및 실리카-섬유재濾過裝置(Silica-fiber candle filter trap) 등이 있다.

本 研究에서는 最近 美國에서 研究 開發중인 세라믹 필터층 가장 여과 效率이 뛰어난

壁流動型 모노리스 트랩(Wall-flow monolith trap)을 使用하여 트랩의 再生特性에 관한 數學的 模型을 設定하여 이의 理論解析結果와 實驗的 데이터를 比較 檢討함으로써 模型設定의 妥當性을 立證하고 再生特性에 影響을 주는 酸素濃度, 入口溫度 및 排氣가스流速 등의 影響을 調査하여 세라믹 필터를 使用한 煤煙低減對策에 寄與하고자 한다.

## 2. 세라믹 필터트랩에서의 煤煙生成과 數學的 解析

### 2.1 煤煙의 生成과 再生

필터트랩의 概念은 그림 1에 나타난 바와 같고 필터내에 많은 通路가 있어 가스가 이 通路를 通過하게 되고 이 때 多孔性壁에 의해서 여과가 일어나게 된다.

필터의 몸체는 가스통과와 여과에 따라 軸方向 및 放射線 方向 모두에 應力을 받게 되므로 熱膨脹係數가 낮고 耐久力이 強한 多孔性 Cordierite ( $2MgO-2Al_2O_3-5SiO_2$ )로 만들어져 있다.

일반적으로 트랩내에서 煤煙은 대개 約  $430^{\circ}C$ 에서 點火하기 始作한다. 그러나 實際走行에 있어서 排氣가스 溫度는  $250\sim 350^{\circ}C$ 까지로 되어서 非現實的이다. 그래서 點火溫度를 낮추거나 혹은 排氣溫度를 높여서 再生이 될 수 있도록 해야 한다.

세라믹 필터트랩에 의한 煤煙再生은 다음 3 段階로 나누어 생각할 수 있다.

#### (1) 貯藏段階

初期에는 化學反應이 없고 溫度의 증가도 없다. 다음 段階로 CO와 HC 酸化 같은 發熱 觸媒反應이 있고 그 후에는 收集된 煤煙物質이 點火하는 것으로 이루어진다. 이 때 背壓은 점점 증가하게 된다.

#### (2) 均衡段階

이 段階에서는 排氣背壓이 一定하게 維持된다. 즉 煤煙除去에 의한 背壓의 減少와 煤煙蓄積에 의한 背壓의 증가가 같은 範圍에 있다.

#### (3) 再生段階

이 段階에서는 再生이 發生하며 再生은 排氣背壓의 減少에 對해서 특징지어 질 수 있다. 完全再生은 매연제거후 排氣背壓이 非負荷된 필터의 초기배압까지 낮아졌을때 이루어진다. 여과, 축적 및 제거는 再生過程동안 필터속에서 동시에 진행된다. 매연은 처음에 트랩의 구멍에서 여과되면서 그 다음에 트랩벽에 층으로 여과된다. 층으로 여과된 매연층은 附加의인 여과매체를 제공하게 된다.

2.2 필터트랩의 數學的 모델<sup>3,4)</sup>

2.2.1 모델設定을 위한 假定

세라믹 모노리스 필터에서 再生過程의 實驗에 根據하여 數學的 모델이 그 再生過程을 시뮬레이션하기 위해서 設定되었다. 이러한 種類의 필터트랩은 排氣가스가 壁流動形 모노리스를 통하여 流動하기 때문에 매우 效率이 높고 이의 材質은 多孔性 Cordierite 이다.

數學的 解析을 單純化시키기 위하여 다음과 같은 假定이 必要하다.

1) 모노리스 필터트랩 前面으로 流入되는 가스의 性質은 軸方向에 對해서는 變化가 없고 周圍의 벽은 完全히 斷熱되어 있다.

2) 排氣가스의 流動은 벽표면에 수직으로 流入된다.

3) 가스와 固相에서의 熱傳達은 對流가 支配적이기 때문에 輻射와 傳導 熱傳達 현상은 無視한다.

4) 粒子는 벽표면에 同一量 蓄積되고 가스상에서의 熱蓄積量은 粒子狀에서의 熱蓄積量에 比하여 無視할 수 있다.

5) 酸素濃度を 除外하고는 모든 物性이 煤煙層에서 一定하다.

6) 매연층의 溫度(Ts)는 流動方向에 對해 等溫의이고 가스溫度 역시 一定하다.

7) 이 流動은 正常狀態流動이다.

2.2.2 數學的 解析

實驗에 의하여 點火溫度  $T_{ign}$  을 流速  $V_s$  와 酸素濃度  $O_2$ , 入口溫度  $T_{in}$  의 함수로서 決定하기 위해 다음과 같은 簡單한 數學的 接近이 行해졌다.

에너지 保存에 의하여

$$\dot{q}''_{accum} = \dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{react} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서  $\dot{q}''_{accum}$ 은 매연층에 蓄積되는 蓄積 熱量率,  $\dot{q}''_{conv}$ 은 가스상과 粒子狀사이의 순수한 對流熱傳達率,  $\dot{q}''_{react}$ 은 粒子狀에서의 酸化에 의한 發熱量率을 뜻한다.

(1) 에너지의 計算

이 解析的 方法은  $O_2$  濃度を 除外한 모든 물질이 얇은 매연층에서 一定하다고 놓고 點火가 일어날 때까지 電氣히터를 使用하여 入口溫度를 增加시킨다.

$$\dot{q}''_{accum} = (1 - \epsilon) \cdot \rho_s \cdot C_{ps} \cdot \beta \cdot w \dots\dots\dots (2)$$

가스상에서 熱蓄積率은 固體狀에 比하여 無視될 수 있다.

$$\dot{q}''_{conv} = s \cdot h \cdot w \cdot (T_o - T_s), (T_o = T_{in}) \dots\dots\dots (3)$$

反應熱은

$$\dot{q}''_{react} = s \cdot (-\Delta H) \cdot F \cdot w \dots\dots\dots (4)$$

(2) 對流 熱傳達係數의 計算<sup>9,10)</sup> : h

對流 熱傳達係數 h는 Bisset & Shadmann에 의해 다음과 같이 表現한다.

$$h = \rho \cdot V_s \cdot C_p \cdot a_1 \cdot (\rho \cdot V_s / s)^{-a_2} \dots\dots\dots (5)$$

Bisset와 Shadmann<sup>3)</sup>은  $a_1$ 과  $a_2$  값을 층진층(Packed bed)에서의 熱傳達特性을 나타내는 係數로 取했다.

對流 熱傳達을 나타내는 式(3)과 (5)의 妥當性을 試驗하기 위하여 층진층을 通過하는 流速 및 그 때의 가스의 上昇溫度를 測定하고 매연층에 여러개의 thermocouple을 設置  $\dot{q}''_{conv}$  값을 決定하는 實驗을 하였다. 이렇게 測定된  $\dot{q}''_{conv}$  값은 다음과 같다.

$$\dot{q}''_{conv} = \rho \cdot V_s \cdot C_p \cdot (T_o - T_{out}) \dots\dots\dots (6)$$

式(3)과 같게 놓으면

$$\frac{T_s - T_o}{T_{out} - T_o} = \frac{\rho \cdot V_s \cdot C_p}{s \cdot h \cdot w} \dots\dots\dots (7)$$

式(7)을 式(5)에 代入

$$\frac{T_s - T_o}{T_{out} - T_o} = \frac{1}{a_1 \cdot s \cdot w \cdot (\rho/s)^{-\alpha_2} V_s^{\alpha_2}} \dots (8)$$

$(T_s - T_o)/(T_{out} - T_o)$  대  $V_s^{\alpha_2}$  의 曲線은 선형적이어야 한다.

(3) 매연 酸化 反應速度論<sup>6,8)</sup>

매연과  $O_2$  와의 反應이  $O_2$  濃度에 있어서 1次反應이라고 가정하면 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(x) = KC(x) \dots (9)$$

反應層에서 酸素濃度の 保存式은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dx}(C \cdot V_s) = -s \cdot k \cdot c \dots (10)$$

경계조건  $C_{x=0} = C_o$  을 사용하여 式(10)을 積分하면

$$C(x) = C_o \cdot \exp\left(-\frac{s \cdot k \cdot w}{V_s}\right) \dots (11)$$

여기에서 平均速度  $\bar{r}$ 가 必要하므로

$$\bar{r} = \frac{\int r(x) dx}{\int dx} \dots (12)$$

式(9)와 (11)을 식(12)에 代入하면

$$\bar{r} = \frac{C_o \cdot V_s}{w \cdot s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{s \cdot k \cdot w}{V_s}\right) \right] \dots (13)$$

式(13)을 式(4)에 代入하면

$$\begin{aligned} \dot{q}_{react} &= (-\Delta H) \cdot C_o \cdot V_s \left[ 1 - \exp\left(-\frac{s \cdot k \cdot w}{V_s}\right) \right] \\ &= 0 \dots (14) \end{aligned}$$

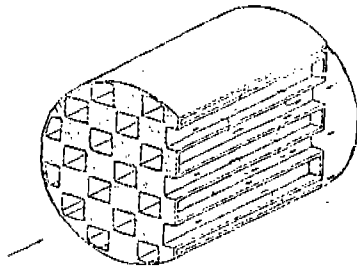


Fig. 1 Sectional view of a wall-flow monolith  
Arrows show the path of gas through the channels

(4) 點火溫度  $T_{ign}$  計算<sup>11)</sup>

點火하기 위한 條件은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{accum} - \dot{q}_{conv} - \dot{q}_{react} &= 0 \dots (15) \\ T_s &= T_{ign} \end{aligned}$$

式(2), (3) 및 (14)를 式(15)에 代入하면

$$\begin{aligned} (1-\epsilon) \cdot \rho_s \cdot C_{ps} \cdot \beta \cdot w - s \cdot h \cdot w \cdot (T_o - T_{ign}) \\ - (-\Delta H) \cdot C_o \cdot V_s \cdot (1 - \exp(-s \cdot k \cdot w / V_s)) = 0 \dots (16) \end{aligned}$$

反應速度  $K$ 를 Arrhenius 形態로 나타내면

$$K = K_o \exp(-E_r / RT_s) \dots (17)$$

式(17)을 式(16)에 代入하면  $T_{ign}$ ,  $C_o$ ,  $V_s$ 의 함수로서  $T_{ign}$ 을 풀 수 있다. 위의 計算을 電算 프로그램하여 處理하였다.

3. 세라믹 필터트랩의 매연 低減 實驗

3.1 實驗裝置와 方法

본 實驗에 使用된 機關은 수냉식 4行程사이클 와류식 디젤機關으로서 그 主要 諸元은 表 1과 같고 세라믹 필터트랩의 諸元은 表 2와 같다.

Table 1. Engine Specifications

Item.	Specifications.
Type	SD-22 Water Cooling, 4cycle Diesel Engine
Number of Cylinder	4Cylinder
Bore × Stroke mm	83 × 100
Piston displacement cc	2164
Combustion chamber	Swirl chamber
Compression ratio	22.0 : 1
Max. Power kw/rpm	29.4/3200
Max. Torque N-m/rpm	119.6/1800
Injection pump	Bosh A type
Injection nozzle	Throttle type
Fuel injection timing (Before TDC/rpm)	200/1000~300/3000

Table 2. Specifications of Ceramic Filter Trap

Diameter×Length	11.84×15.24 cm
Cell Density	15.5 Ce/cm <sup>2</sup>
Wall Thickness	12mm
Mean Pore Diameter	15~30 μm
Porosity	30~50%

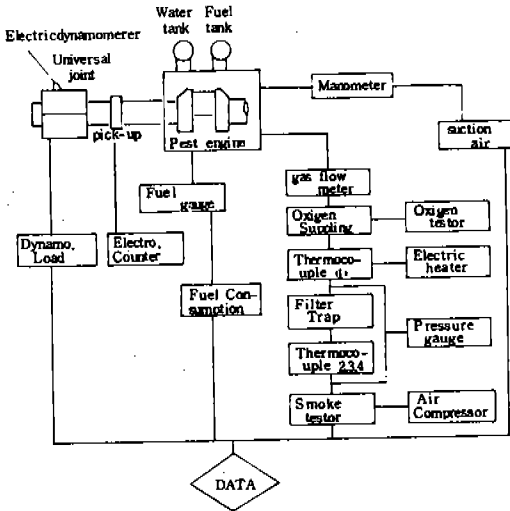


Fig. 2 Schematic Block diagram of Experimental Apparatus

본 實驗의 概略圖는 Fig.2와 같다.

한편 필터의 設置構造는 Fig. 3과 같이 設置하였으며, 매니폴드 뒤에 設置한 필터트랩은 세라믹 매트로 둘러 斷熱시킨 다음 이것을 캔속에 넣었다. 필터 앞 쪽에는 電氣히터, 酸素供給線, 背壓測定裝置, 流速測定裝置 및 Thermocouple를 設置하며 필터트랩 뒤에는 背壓 및 매연 測定裝置를 設置한다. 필터트랩 내의 溫度를 測定하기 위하여 3개의 Thermocouple를 一定間隔으로 트랩내에 設置한다. 매연도 測定에 使用한 스모크미터는 여과지 反射式 排氣 매연 測定器(日製: GSN:2)이다.

實驗方法은 필터를 裝着하고 8분동안 加溫을 시킨 다음 매연 트랩내의 溫度, 트랩입구 溫度, 背壓 배기가스 流速 및 매연을 測定한다. 트랩내의 溫度는 thermocouple로부터 自

動으로 每分 測定케 하였고 매연은 매분 2장씩 測定하여 平均을 내어 記錄하였다. 또 배기가스 流速은 필터 앞쪽에 設置된 液柱計를 通하여 流速을 測定하였다. 배기가스 溫度가 어느정도 高溫에 達했을 때 酸素를 一定하게 1 kg/cm<sup>2</sup>로 注入 試藥을 使用한 測定計器를 利用 酸素濃度를 5分 間隔으로 測定하였고 이때 電氣히터를 作動시켜 附加의 熱을 供給하여 줌으로서 再生이 容易하게 일어나도록 하였다.

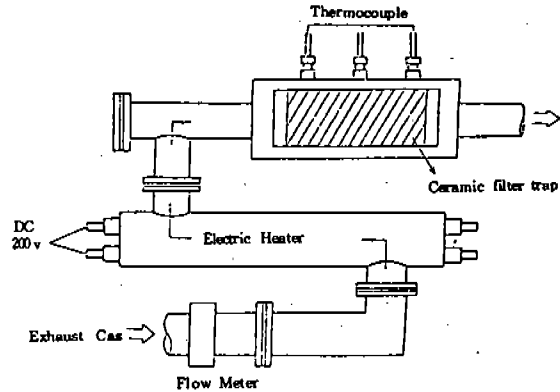


Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1 매연 低減效果와 溫度分布

Fig. 4의 A는 市中 머물러와 필터트랩의 매

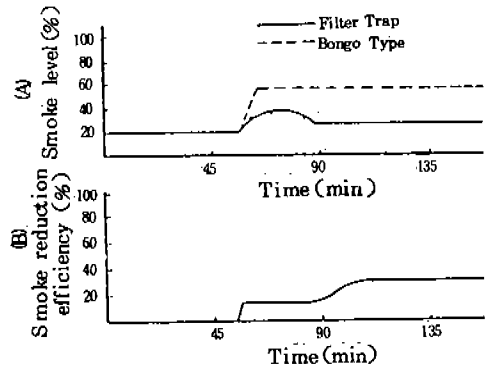


Fig. 4 Smoke level and smoke reduction efficiency of filter trap and bongo type

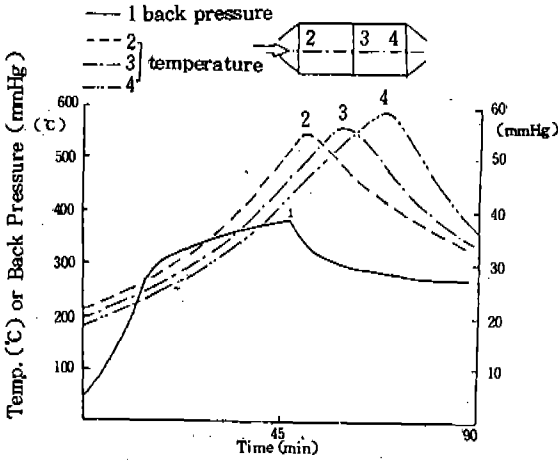


Fig. 5 Comparison of DPF Temperature Profile and Pressure

연도를 나타내고 있고, B는 市中 머플러에 대한 필터트랩의 매연低減效率를 나타낸 것이다. 여기에서 보는바와 같이 市中 머플러보다 약 30% 정도의 매연低減效果를 보여주고 있다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 누적된 粒子狀은 附加的인 에너지의 供給과 필터로 들어오는 높은 溫度의 배기가스에 의해 點火되고 粒子酸化時 發熱된 熱에 의하여 트랩내에서 燃燒領域이 漸次的으로 트랩入口에서 出口 쪽으로 移動하는 것을 볼 수 있다.

4.2 모델의 妥當性和 再生溫度에 미치는 影響

測定한 酸素濃도에 대한 點火溫度와 數學的 解析에서 計算된 點火溫度가 Fig. 6에서 比較 檢討한 바 거의 一致함을 볼 수 있다. 이로서 數學的 모델에 대한 妥當性を 立證할 수 있었다.

또한 排氣가스의 流速이 再生溫度에 미치는 影響을 考察하면, 排氣가스 入口溫度가 一定 할 때 필터트랩내의 粒子狀 點火溫度는 排氣가스 流速 增加와, 酸素濃도가 減少함에 따라 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 流速이 增加함에 따라 再生熱의 大部分이 트랩바깥으로 빼앗기기 때문이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 排氣가스流速이 15m/sec까지는 再生溫度

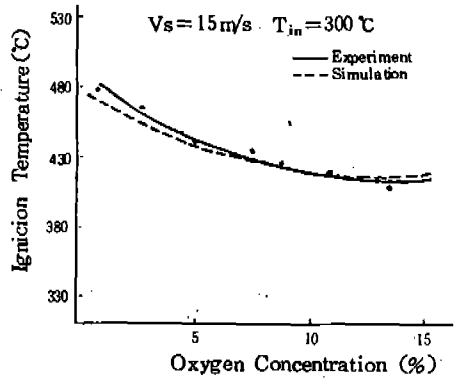


Fig. 6 Ignition temp. during regeneration vs O<sub>2</sub> concentration

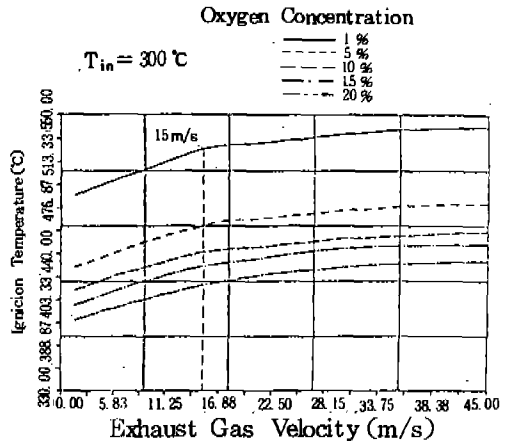


Fig. 7 Effect of Exhaust Gas Flow Velocity and O<sub>2</sub> concentration on the Ignition Temperature

의 變化는 急激히 上昇하다 그 후에는 再生 溫度變化가 적어져 거의 一定함을 보여주고 있다. 따라서 본 필터트랩의 最適 流速은 약 15m/sec 정도임을 알 수 있다.

한편 酸素濃도와 트랩入口溫度가 再生溫度에 끼치는 影響을 살펴보면 배기가스 流速이 15m/sec로 一定할 때 Fig. 8에서 보는 바와 같이 粒子狀의 點火溫度는 酸素濃도와 入口溫度가 增加함에 따라 減少한다. 定常運轉條件下에서 排氣가스溫度는 普通 200~400 °C 정도이다. 따라서 본 필터트랩에서 再生이 일어나기 위해서는 排氣가스 流速이 15m/sec 인 狀態에서 Fig. 8에서 보여주는 바와같이 酸素濃도 5% 정도까지는 再生溫度가 急降下한다.

그 以上에서는 再生溫도의 減少變化가 적게 나타나므로 最小限 酸素濃도가 5% 以上은 되어야 함을 엿볼 수 있다. 위의 再生溫度 및 가스유속은 다른 研究<sup>2,3,6)</sup>와 비슷한 結果를 가져옴으로 본 研究의 妥當性을 再確認할 수 있었다.

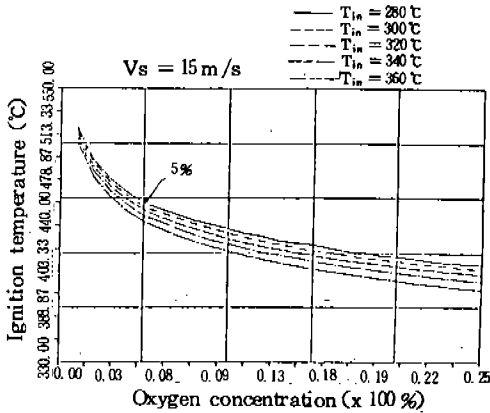


Fig. 8 Effects of  $O_2$  concentration and trap temp on the ignition temp.

## 5. 結 論

디젤 機關에 있어서 再生溫度에 影響을 미치는 因子中 酸素濃度, 排氣가스流速 및 트랩入口溫度에 대하여 理論解析 및 實驗을 통하여 綜合檢討한 바 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 再生過程에 대한 數學的 모델이 設定되었고 여기에서의 計算結果와 實驗結果가 거의 一致하여 본 모델의 妥當性이 立證되었다.

(2) 蓄積된 粒子狀의 點火溫度는 排氣가스流速에 比例하여 流速이 약 15m/sec 일 때가 가장 最適 流速임을 알 수 있었다.

(3) 본 필터트랩에서 蓄積된 粒子狀의 點火溫度는 酸素濃도와 필터入口溫度와는 반비례하였고 排氣가스流速이 약 15m/sec 인 경우 5%의 酸素濃도가 再生을 하기 위한 最適 酸素濃도임을 發見하였다.

(4) 實際 필터트랩은 既存 머플러에 비해 매 연低減率이 약 30% 程度임을 알 수 있었다.

## 參 考 文 獻

1. O.A. Ludecke, D.L. Dimick; "Diesel Exhaust Particulate Control System Deve-

lopment" SAE Paper No.830085.

2. B. Wiedemann, U. Doerges, W. Engeler, B. Poettner; "Regeneration of Diesel Particulate Filters at Temperatures" SAE Paper No.830086.
3. E.J. Bisset, F. Shadmann; "Thermal Regeneration of Diesel Particulate Monolithic Filters" A.I.Ch.E. Journal 31, 1985.
4. W.R. Wade, J.E. White, J.J. Florek; "Diesel Particulate Trap Regeneration Techniques" SAE Paper No.810118.
5. E. Pauli; "The Calculation of Regeneration Limits of Diesel Particulate Traps for Different Regeneration Methods" SAE Paper No.840075.
6. G.M. Simon, T.L. Stark; "Diesel Particulate Trap Regeneration Using Ceramic Wall-Flow Traps, Fuel Additives and Supplemental Electrical Igniters" SAE Paper No.850016.
7. Z.M. Mokaka; "Performance and Regeneration Characteristics of a Cellular Ceramic Diesel Particulate trap" SAE, 1982.
8. E. Pauli, G. Lepperhoff; "The Discription of the Regeneration Behavior of Diesel particulate Traps with the Aid of a Mathematical Model" SAE 830180.
9. B. Widemann, U. Doerges; "Applications of Particulate Traps and Fuel Additives for Reduction of Exhaust Emmisions" SAE Paper No.840078.
10. Kenichirou Takama, Kiyoshi Kobashi; "Regeneration Process of Ceramic Foam Diesel-Particulate" SAE Paper No.841394.
11. M.A. Field, D.W. Gill, B.B. Morgan, P.G.W. Hawksley; "Combustion of Pulverized Coal" BCURA Leatherhead, Cheroyand Sons, Ltd., Banbury, England, 1967.
12. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Light; "Transport Phenomena" John Wiley and Sons, New York, 1960.