

直噴式 디젤機關에서 Cavity形狀이 燃燒特性과 排出微粒子에 미치는 영향

Influence of Cavity Geometry on Combustion Characteristics and Particulate in D. I. Diesel Engine

이 상 석*, 김 희 년**, 김 봉 곤***, 하 중 료****
S. S. Lee, H. N. Kim, B. G. Kim, J. Y. Ha

ABSTRACT

The combustion chamber geometry, especially cavity geometry have an effect on the air-fuel mixture process, gas flow in cylinder and combustion itself.

Three types of piston cavity model were compared in order to investigate with the effect of cavity geometry on combustion characteristics, engine performance and exhaust gas emission; as the results Reflex type has superior performance compared with the other cavity types.

1. 序 論

直噴式 디젤機關은 低燃費, 高效率 등으로 그 수요가 증가 추세에 있다. 이러한 디젤機關의 燃燒特性을 지배하는 因子로서는 噴射된 燃料과 空氣와의 混合特性이 거론되고 있으며, 특히 피스톤이 上死點 근방에 위치할 때의 피스톤 Cavity를 포함한 燃燒室 내에서의 Swirl, Squish 流 등이 燃料과 空氣의 混合과 燃燒에 큰 影響을 주는 것으로 알려져 있다. 이러한 燃燒室 내에서의 燃料, 空氣의 混合過程은 燃燒室 形狀, 특히 Cavity 모양에 影響을 받게 되고, 그 결과 機關의 出力性能, 排出가스 成分 등과도 密接한 關係를 가질 것이다.

이에 本 研究은 燃燒室 구조, 噴霧의 발달

과정 및 공기유동과의 關係를 고려한 피스톤 Cavity 3種類를 설계, 제작하여 Cavity 형상에 따른 機關의 燃燒狀態를 解析하고 微粒子狀 排出物質(이후 微粒子로 표현)의 重量을 測定하여 直噴式 디젤機關에서 Cavity 형상이 燃燒特性 및 微粒子의 排出에 미치는 影響을 밝히는 것을 目的으로 한다.

2. 實驗裝置 및 方法

實驗裝置는 試驗機關, 機關動力計, 壓力測定裝置 및 微粒子測定裝置로 大別할 수 있으며, 裝置의 구성은 Fig.1에, 試驗機關의 主要諸元은 Table 1에 나타내었다.

실린더 내에서의 壓力測定은 실린더헤드부

* 정회원, 동아대학교 대학원

** 정회원, (주)서고 연구소

*** 정회원, 동의공업전문대학 기계설계과

**** 정회원, 동아대학교 기계공학과

에 설치된 Electric resistance wire strain gage 壓力變換器(rated capacity: 100 kgf/cm²; MP-100k-18. Minebea co.)로부터 감지된 壓力의 電氣의 信號를 增幅器, A/D 變換機의 순으로 移送시키고, 크랭크각 1도마다의 信號를 Interrupter 로 사용하여 壓力 데이터를 採取하고, 동일 각도 스케일을 사용하여 TDC

信號를 발생시켰으며, 이를 壓力 데이터와 同期化시켜 표시했다.

A/D 變換機는 入力電壓 範圍가 ±5 V, conversion time 30 μs, 分解能 12bit의 機能을 가진다. 壓力變換器로부터 데이터 移送 경로를 통하여 컴퓨터의 記憶裝置에 記憶된 N cycle분의 壓力데이터를 Ensemble averaging 法으로 임의의 크랭크각 θ에서의 代表值를 구하고, 이 값으로 指壓線圖를 작성하여 이를 燃燒解析에 이용하였다.

排出微粒子의 測定은 排氣가스가 大氣중에 방출된 狀態를 재현시켜 그 重量濃度로써 微粒子量을 판단하는 방법으로 EPA 규정¹⁾에 준하는 稀釋터널장치²⁾를 사용하였다. 送風機에 의해 吸入되는 稀釋用 公기는 微粒子를 제거하기 위해 공기 청정용 필터(0.3 μm 粒子를 99% 濾過)를 통과시켰으며, 吸入空氣 溫度를 일정하게 유지시키기 위하여 加熱部를 설치하였다.

機關에서 排出된 排氣가스는 稀釋터널의 배기가스 주입부를 통하여 전량 稀釋 터널부로 주입되고, 배기가스와 공기와의 混合을 양호하게 하기 위하여 混合用 오리피스를 설치하여 稀釋시켰다. 稀釋된 배기가스의 일부는 진공펌프에 의해 稀釋터널 下流에 설치된 混合가스 採取 프로브를 통하여 吸入되고, 이 가스는 필터 홀더부에 裝着된 微粒子 採取用 필터(0.3 μm의 微粒子 99.99% 濾過 가능한 Taplon-coated glass fiber filter)를 통과함에 의해 濾過된다.

여과된 필터는 수분을 제거하기 위해 24시간 이상 건조시킨 후 天秤(최소눈금 0.1 mg)으로 그 重量을 測定하여 微粒子 採取前의 필터(24이상 건조)중량을 감한 값을 微粒子의 重量으로 하였다.

微粒子 採取用 가스량은 濕式流量計로써 確認하여 일정값(EPA 규정과 필터의 막힘 등을 고려하여 20 l/min으로 10분간 採取)이 되도록 했으며, 稀釋터널을 통과하는 混合가스량을 測定하기 위하여 4分圓 오리피스를 採取用 가스 프로브 후방에 설치하였다. 한편, 微粒子를 採取한 필터를 사용하여 스토크미터로

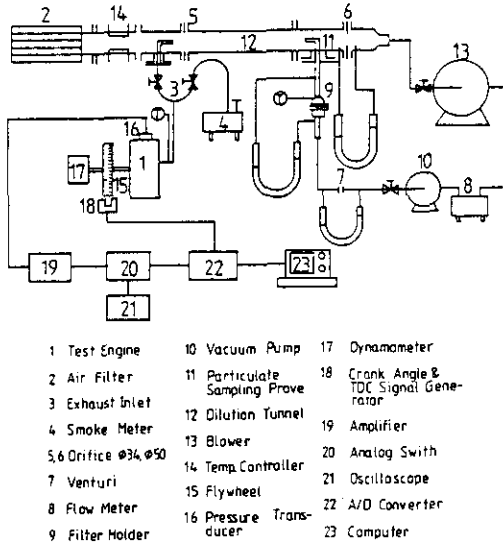


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table 1 Specification of Test Engine

Description	Specification
Type	4 Cycle Water Cooling D. I. Diesel Engine
No. of Cylinders	1
Piston Displacement	0.631(L)
Bore × Stroke	92 × 95 (mm)
Compression Ratio	19
Rated Power	8/2200(Ps/rpm)
Maximum Power	11/2200(Ps/rpm)
Injection Timing	BTDC 20°
Injection Nozzle	Hole Nozzle (4-φ 0.3 mm)
Fuel Injection Pressure	21.57 Mpa

써 스모크도를測定하였다.

本 研究에서는 기관의 공기 유동 특성을 고려한 3가지 種類의 피스톤 Cavity형상, 즉 Dish, Toroidal, Reflex형 피스톤을 제작하여, 기관의 運轉條件 1,000rpm(0/4부하, 0.4ps), 1,400rpm(2/4부하, 1.3ps), 1,800rpm(3/4부하, 3.3ps), 2,200rpm(4/4부하, 6.0ps)에 따른 燃燒解析 즉, 壓力의 時間經過, 熱發生率, 壓力上昇率, 質量燃燒率, 指示平均有效壓력과 배기가스 중의 微粒子 重量測定을 통하여 燃燒解析 및 微粒子 排出特性을 비교, 평가하였다.

Fig.2에 Cavity형상별 指示平均有效壓力 P_{mi} 를 기관회전수와 負荷에 따라 표시하였다. 水動力計로써 같은 實驗條件에서 같은 負荷가 되도록 조정하였으나, 최고 0.2kgf/cm^2 의 差를 보이는 조건도 있음을 나타낸다.

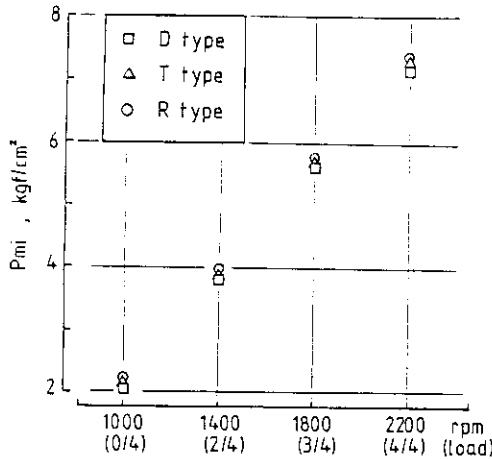


Fig.2 Indicated mean effective pressure for RPM(load)

3. 가스 流動 豫測

Cavity 形狀에 따른 가스 유동의 豫測은 Fig. 3과 같다.

Dish형(이후 D형으로 표현)에서의 공기 유동 豫測은 下田³²⁾이 油漠法을 사용한 實驗의 確認과 2次元軸對稱 모델에 의한 실린더 공기유동 豫測 計算結果와 池上 등⁴³⁾이 실린더내에서의 공기유동, 혼합기 분포의 3次元의 거동 등을 豫測한 結果를 參考로 하였다. 즉, 충돌한 噴霧가 벽면을 따라 성장하여 모서리부에서 성장이 분화되고, 噴霧의 表面積은 상대적으로 감소하여 공기와의 接觸 表面積이 감소한다. 이 경우, 上死點 부근에서의 공기유동은 피스톤 상승과 함께 유속은 加速되고 逆方向으로 회전하는 Vortex가 형성될 것으로 예상된다. 이때의 Vortex는 강도가 적고 회전범위가 클 것으로 예상된다.

Toroidal형(이후 T형으로 표현)에서는 벽면에 충돌한 噴霧가 Cavity면을 따라 성장하여 노즐에서 벽면까지의 거리가 상대적으로 길어지고, 공기에 대하여 接觸 表面積이 넓어진다. 이 경우 상사점 부근에서의 空氣流動은 피스톤의 상승과 함께 流速은 加速되어 찌그러진 逆方向의 Vortex가 형성될 것으로 예상된다.³³⁾

Reflex형(이후 R형으로 표현)은 3次元 非定常亂流 流動解析을 통한 豫測結果⁶⁾를 參考하였다. 벽면에 충돌한 噴霧가 Cavity 밀부분으로 성장하여, 공기에 대한 表面積이 증가함으로써 噴霧 초기의 Entrainment량이 상대적으로 增加할 것으로 豫測된다. 이 경우 상사점 부근에서의 공기유동은 피스톤의 상승과 함께 流速은 加速되고 두개의 영역으로 회전하

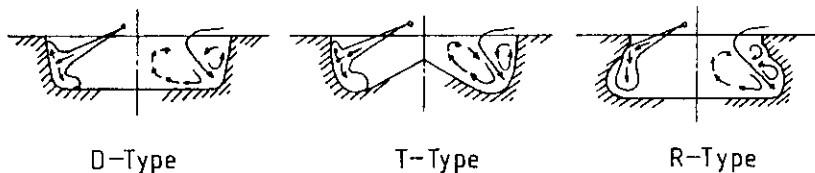


Fig.3 Spray & Gas Flow Model According to Cavity Type

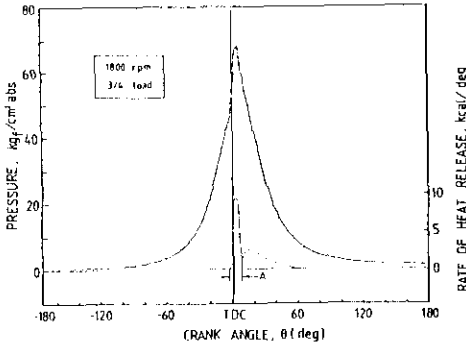


Fig. 4 P-θ & dQ/dθ Diagram

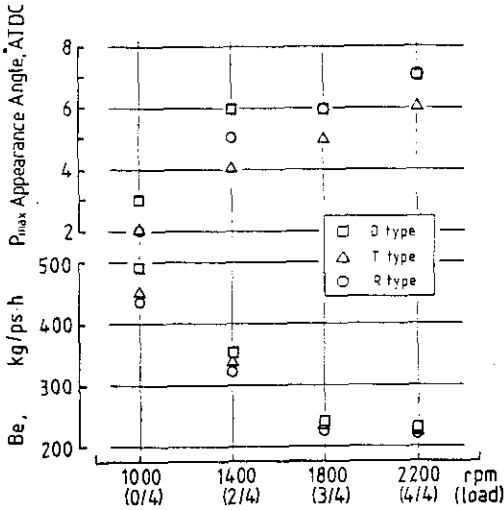


Fig. 5 Rate of Fuel Consumption & Pmax Appearance Angle for RPM (Load)

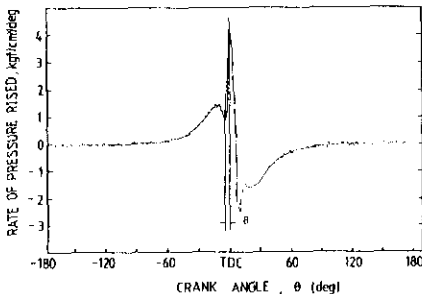


Fig. 6 dp/dθ Diagram

는 Vortex를 가지며, 이 현상들은 Swirl 형태로서 Cavity내에서 유동할 것으로 類推된다.

4. 燃燒特性 比較 分析

Fig. 4에는 1,800rpm, 3/4 負荷에서의 R형 Piston cavity에 의한 P-θ 線圖와 熱發生率 (dQ/dθ) 線圖를 나타낸다. 着火時期는 P-θ 線圖에서 上死點 근처, 壓縮 끝부분에서 나타나는 變曲點으로 했으며, 着火後 壓力의 上昇 勾配가 큰 기간을 急激燃燒期間(豫混合燃燒期間; dQ/dθ 線圖에서 A구간), 그 後를 擴散燃燒期間 및 後燃燒期間으로 표현하였다. P-θ 線圖의 最高壓力값을 P_{max}로, 그 발생 위치를 最高壓力發生角으로 정의하였다. dQ/dθ 線圖에서는 豫混合燃燒量을 A의 표시 범위까지로 하여 熱發生 시작점에서부터 해당 크랭크각도 까지의 發生熱量을 積算하여 표현하였다.

Fig. 5는 동일 운전조건에서 3종의 피스톤으로 구동시킨 경우의 燃料消費率 Be와 燃燒 最高壓 P_{max}의 발생 위치를 해당 크랭크각도로 나타내었다. 燃料消費率은 低速, 低負荷에서는 430~490g/ps·h로 그 값의 차이를 보이며, 高速, 高負荷일수록 그 값의 차이가 적어짐을 알 수 있다. 燃料消費率을 Cavity에 대해 비교하면 R형이 전조건에서 D형에 비해 최고 8.9%, 최저 0.4%, T형에 비해 최고 2.5%, 최저 0.16% 정도 낮은 값을 보인다. Be는 R형의 경우가 가장 낮고, T형, D형의 순으로 나타남을 알 수 있다. 이 현상은 Fig. 2에서 R형의 P_{mi}가 약 0.14kgf/cm² 씩 높은 것을 감안하면 더욱 큰 차이가 있을 것으로 推測된다.

Fig. 6은 1,800rpm, 3/4 負荷에서 P-θ 線圖로부터 구한 壓力上昇率線圖의 一例이다. 초기의 壓力이 極大點을 보인 후 감소하여 극소점을 나타내는 위치를 着火點으로 판단하였으며 이 위치는 P-θ 線圖의 着火點과 잘 일치함을 確認하였다. 그림에서의 B부분은 初期燃燒狀態(豫混合燃燒)를 비교하기 위한 初期 壓力上昇率 구간으로서 θ變化에 따른 P

變化를 나타내고 이는 初期燃燒狀態의 격렬함, 즉 機關의 Knock 발생 여부를 알 수 있다. 그 후를 擴散燃燒期間으로 판단하였으며 또한, 熱發生時期는 壓力이 급격히 상승하기 전의 變曲點 部分이며, 熱發生 끝점은 壓力上昇이 완만하여 基準線까지 하강한 점으로 하였다.

Fig. 7은 모든 實驗條件에서의 豫混合燃燒部 平均기울기 값과 着火時期를 나타내며, 팔호 안의 값은 豫混合燃燒期間을 나타낸다. 初期燃燒狀態를 알 수 있는 豫混合燃燒部の 平均 기울기는 전체적으로 T형이 크고, 着火時期는 R형의 경우가 모든 實驗條件에서 빠르며, 그 순서는 R형, T형, D형으로 나타났다. 着火時期와 豫混合燃燒部の 壓力上昇率($dP/d\theta$)를 비교하면 T형은 着火時期가 늦으며, 豫混合燃燒部の 기울기는 크고, R형의 着火時期는 빠르며 豫混合燃燒部の 기울기는 작게 나타나고, D형은 着火時期나 豫混合燃燒部の 기울기 값이 모두 늦고 작음을 알 수 있다. 이는 T형의 着火時期가 늦으므로 R형에 비해 초기에 급격하게 燃燒한다는 것을 의미하고 D형은 과도한 着火遲延에 의한 影響으로 판단된다.

Fig. 8은 1,800 rpm, 3/4 負荷에서의 각 피스톤 Cavity형상에 따른 質量燃焼率線圖의 비교를 나타낸다. R형 Cavity를 갖는 피스톤의 경우, 着火時期는 빠르나 T형에 비해 初期

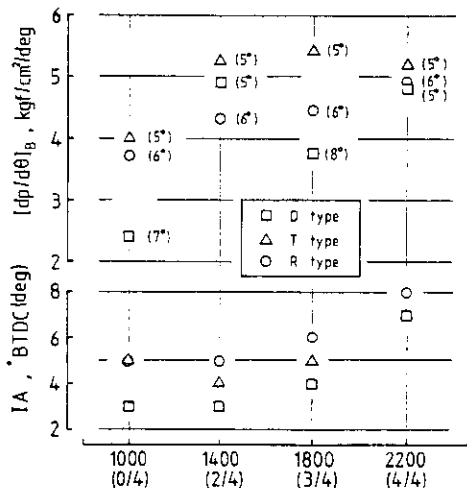


Fig. 7 Ignition Time & Pressure Rised at Part B for RPM (Load)

燃燒量이 9kcal 정도 적으며, D형은 과도한 着火遲延으로 豫混合燃燒期間중의 發生熱량이 적다. 擴散燃燒部는 R형의 경우가, 임의의 크랭크각을 基準으로 할 때 T형이나, D형에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 着火時期가 상대적으로 빠른 R형은 初期燃料噴射量, 즉 豫混合量이 적고, T형은 着火遲延으로 인한 豫混合量이 많기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 모든 實驗條件에서의 豫混合燃燒量

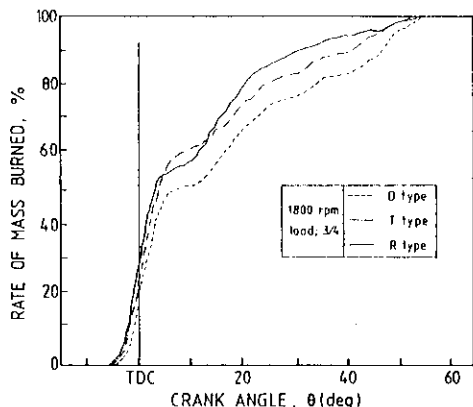


Fig. 8 The Rate of Mass Burned & Crank Angle

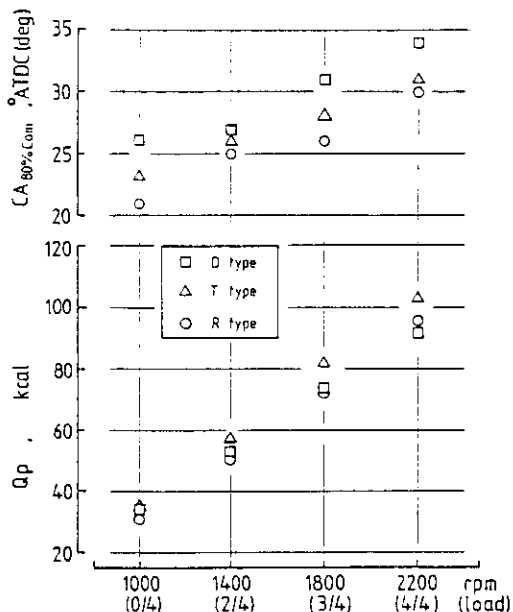


Fig. 9 Rate of Heat Release at Part A & the Angle of 80% Combustion for RPM (Load)

과 80% 燃焼量에 도달하는 크랭크각 위치의 비교를 보인다. 初期燃焼狀態를 알 수 있는 豫混合燃焼量은 Fig. 4의 $dQ/d\theta$ 線圖에서 A 部의 豫混合氣의 燃焼에 의한 熱發生量으로 하였으며, 각 Cavity별 豫混合燃焼量은 모든 조건에서 T형의 경우가 많게는 12kcal, 적게는 0.2kcal 많으며, 이는 Fig. 7의 豫混合燃焼部 평균 기울기 값, 또는 着火遲延이 R형 보다 긴 현상과 잘 일치함을 알 수 있다. 初期燃焼期間중에 Soot, CO, HC 등의 有害 가스가 많이 발생하는 것⁶⁾을 감안하면 豫混合燃焼량이 많은 것은 상대적으로 有害 가스成分의 多量發生을 의미한다. R형의 경우 着火時期가 T형이나, D형에 비해 앞서고 豫混合燃焼量 Q_p 는 T형의 경우가 많으나 有效熱發生의 한계로 보는 80% 燃焼位置는 T형에 비해 2~3度 빠르게 나타난다.

Fig. 10은 동일 운전조건에서의 Cavity형상에 따른 微粒子重量濃度 PE의 대표치, Smoke比와 排氣溫度와의 비교를 나타낸다. 排氣

溫度는 R형이 T, D형에 비해 2~8℃ 범위에서 높게 나타나고 있으며 그 순서는 R, T, D형이다. 微粒子 重量濃度는 高負荷로 갈수록 그 값이 적어지고 微粒子 重量濃도로 본 標準偏差는 각 實驗條件에 따라 다르나 0.04~0.27의 범위를 보였으며, 각 測定値에 따라 범위를 표시하였다. 범용 Smoke meter 로써 稀釋된 상태에서 採取한 필터를 測定한 Smoke比는 2,200rpm, 4/4負荷의 값을 100%로 간주하였을 때 高負荷일수록 그 값이 증가함을 알 수 있다. 이것은 機關運轉條件에 있어서, 負荷가 증가함에 따라 固體炭素(Dry soot)量은 증가하지만, 반면 可溶性有機物質(SOF; Soluble Organic Fraction) 등의 排出量은 減少하는 것을 의미한다. 이러한 現象은 이미 發表된 報告⁷⁾에서도 確認된 바 있다. 이를 確認해 주는 1,400rpm, 2/4負荷, 2,200rpm, 4/4負荷에서의 微粒子 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 Fig. 11에 보인다. 이는 Cavity형상과 負荷에 따라 微粒子를 採取한 필터를 4,000배 擴大한 사진이며 사진 중의 흰 선들은 필터의 材料인 纖維質이며 纖維質 사이의 막과 같은 것은 低負荷에서는 넓게 분포하고 있으며, 高負荷에서는 減少하여 눈송이 같은 것이 많이 분포함을 알 수 있다. 막과 같은 것은 微粒子 중의 可溶性有機物質(SOF) 등으로 推測되고, 눈송이 같은 것은 固體炭素(Dry soot)로 판단된다. 이는 Fig. 10의 微粒子 重量濃도와 Smoke比의 관계에서 負荷가 적을 때는 SOF 등이, 負荷가 증가할수록 Dry soot가 증가함을 잘 증명해 주고 있다. Cavity형상에 따라 비교하면 2,200rpm, 4/4負荷에서의 Dry soot의 직경은 D형이 평균 4 μ m, T형이 3 μ m, R형이 1 μ m 정도로서 D형 Cavity를 사용한 경우가 가장 크고 T형, R형의 순서를 보인다. 이상과 같이 R형이 T형에 비해서 點火時期가 빠르고 豫混合燃焼량이 적으며 80% 燃焼 도달시기가 빠르며 燃料消費率이 낮고 微粒子排出量이 적은 것은 噴霧가 Reflex면에 충돌하는 시기가 상대적으로 빠르고 噴霧와 空氣와의 接觸面積이 넓으며, Squish流에 의한 Vortex 형성과

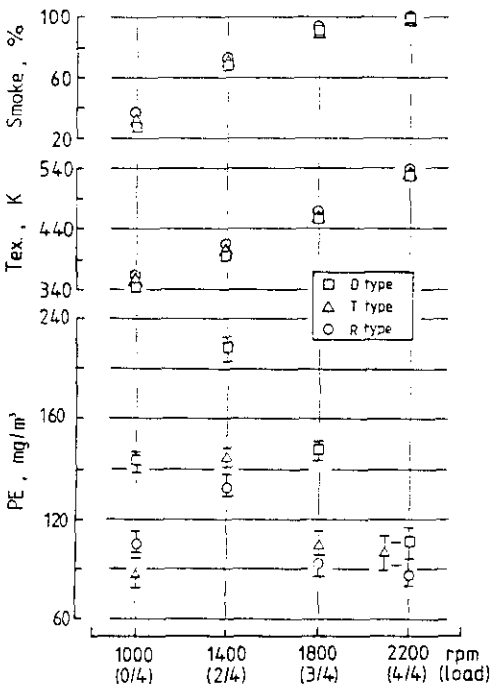
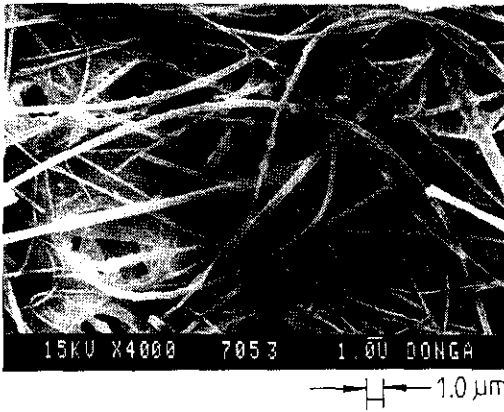
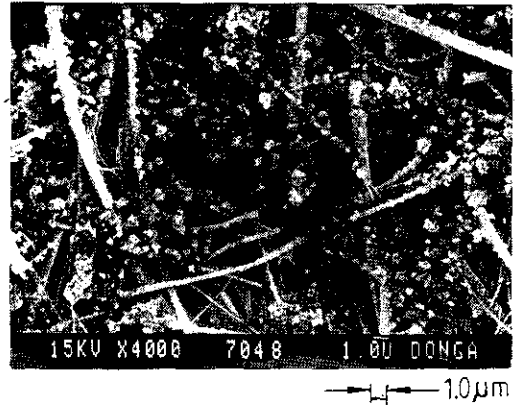


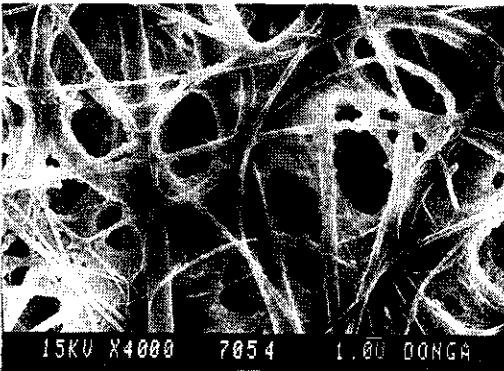
Fig. 10 Representation Value of PE & Exhaust Gas Temp., Smoke Rate for RPM(Load)



(a) R type



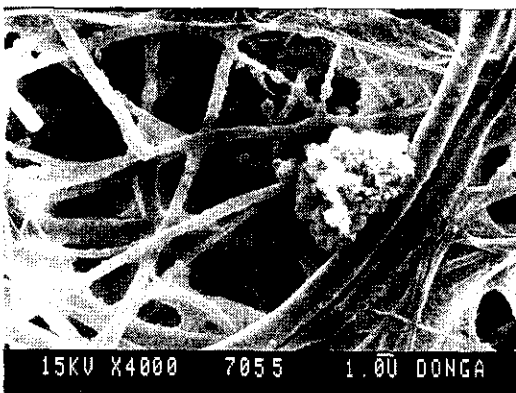
(a) R type



(b) T type

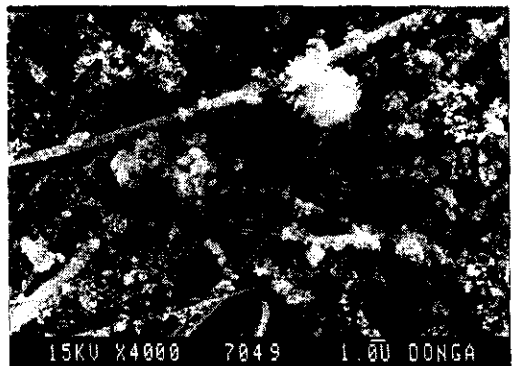


(b) T type



(c) D type

1400 RPM
(2/4)



(c) D type

2200 RPM
(4/4)

Fig.11 SEM Photographs of Particulates for RPM(Load)

燃料·空氣의 混合이 良好하여 擴散燃焼時의 燃焼速度가 빠르기 때문에 推測되며 앞 부분에서 類推한 結果와 잘 일치하고 있다.

5. 結 論

直噴式 디젤機關 燃焼室 內的 空氣流動과 噴霧到達距離에 對한 空氣·燃料 混合 條件을 고려하여 새로운 Cavity 형상(Reflex type)을 고안, 제작 및 구동을 행하고, 既存 Cavity 形상을 갖는 피스톤을 사용한 경우의 燃焼特性, 出力性能 및 排出微粒子 重量과 비교 평가하여 Reflex type의 Cavity를 갖는 피스톤의 우수성을 確認하였다.

1) Reflex type의 경우, 同一 運轉條件에서 상대적으로 着火時期가 빠르고, 初期燃焼의 壓力 增加 勾配가 비교적 완만하여 豫混合 燃焼量이 적고, 80% 熱發生 到達時期가 빠르게 나타났다.

2) Reflex type의 경우, 同一 運轉條件에서 상대적으로 燃料消費率이 낮게 나타났다.

3) 排出微粒子 重量濃도는 대부분의 運轉條件에서 Reflex type의 경우가 상대적으로 낮은 값을 보였다.

後 記

本 論文은 韓國學術振興財團의 1986年度 學術研究助成費 支援에 의하여 이루어진 研究結果의 일부로서 同 財團의 研究 支援에 대하여 감사드립니다.

또한, 本 研究를 遂行함에 있어서 많은 협조를 해주신 (株)大同工業社 研究所 여러분에게 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

1. Environmental Protection Agency, "Standard for Emission of Particulate Regulation for Diesel-Fueled Light-Duty Vehicles and Light-Duty Trucks", Federal Register vol.45, No.45, pp.14509~14515, 1980.
2. 河鐘律, 卓泳祚, "디젤機關에서 排出되는 微粒子의 測定方法에 對한 研究", 自動車工學會 秋季講演論文集, pp.30~35, 1986.
3. 下田 正敏, "D. I. Diesel Engine에 있어서 燃焼解析에 對한 研究", 慶應義塾大學 大學院 博士學位 論文, 1985.
4. 池上 海外 2名, "디젤燃焼過程의 3次元 Simulation", 日本機械學會 論文集, Vol.53, No.491, pp.2241~2250, 1987.
5. 大澤 克幸外 2名, "新型直噴 디젤燃焼法에 있어서 空氣流動의 混合氣 形成의 數值解析", 日本自動車技術會論文集, No.44, pp.3~8, 1990.
6. Yuzo Aoyagi, et al., "A Gas Sampling Study on the Formation Processes of Soot and NO in a D. I. Diesel Engine", SAE Trans. 800254.
7. 佐藤 豪外 2名, "디젤機關의 微粒子狀 排出物의 低減에 對한 研究", 日本機械學會 論文集 Vol.52, No.479, pp.2753~2759, 1986.